



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE
MANTENIMIENTO**

**“DETECCIÓN DE MODOS DE FALLA MEDIANTE EL
ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA CORRIENTE
ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN TIPO
JAULA DE ARDILLA TRIFÁSICOS.”**

**CALLE CORNEJO DEYSI GABRIELA.
DÍAZ BARAHONA HERMEN PATRICIO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA – ECUADOR

2015

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-12-23

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

DEYSI GABRIELA CALLE CORNEJO

Titulada:

**“DETECCIÓN DE MODOS DE FALLA MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE
LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE
ARDILLA TRIFÁSICOS.”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERA DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Marco Santillán G.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. César Astudillo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRES DEL ESTUDIANTE: DEYSI GABRIELA CALLE CORNEJO

TÍTULO DE LA TESIS: “DETECCIÓN DE MODOS DE FALLA MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE ARDILLA TRIFÁSICOS.”

Fecha de Examinación: 15 de diciembre de 2014

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|---|---------|------------|-------|
| Ing. Fernando González Puente PRESIDENTE TRIB. DEFENSA | | | |
| Ing. Marco Santillán G. DIRECTOR DE TESIS | | | |
| Ing. César Astudillo ASESOR | | | |

RECOMENDACIONES:

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González Puente
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-12-23

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

HERMEN PATRICIO DÍAZ BARAHONA

Titulada:

**“DETECCIÓN DE MODOS DE FALLA MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE
LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE
ARDILLA TRIFÁSICOS.”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Marco Santillán G.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. César Astudillo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRES DEL ESTUDIANTE: HERMEN PATRICIO DÍAZ BARAHONA

TÍTULO DE LA TESIS: “DETECCIÓN DE MODOS DE FALLA MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE ARDILLA TRIFÁSICOS.”

Fecha de Examinación: 15 de diciembre de 2014

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|---|---------|------------|-------|
| Ing. Fernando González Puente PRESIDENTE TRIB. DEFENSA | | | |
| Ing. Marco Santillán G. DIRECTOR DE TESIS | | | |
| Ing. César Astudillo ASESOR | | | |

RECOMENDACIONES:

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González Puente
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Deysi Gabriela Calle Cornejo

Hermen Patricio Díaz Barahona

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por ser mis mejores amigos y que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, pese a la distancia me supieron motivar y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba y si hay algo que sé hacer bien, es por ustedes.

A todas las personas que participaron e hicieron posible este tesis que en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que se presentan en esta vida.

A mis hermanos por estar conmigo en las buenas y en las malas, por su confianza y su apoyo.

A mi familia por su apoyo incondicional y sus consejos que me han servido para seguir adelante.

A Hermen por su infinita paciencia, su tiempo y alentarme para continuar cuando parecía que me iba a rendir.

Deysi Gabriela Calle Cornejo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a todas las personas que me acompañaron en esta vida estudiantil, en especial a mis padres que siempre me impulsaron para terminar este reto, a mis hermanos por su ayuda y apoyo incondicional.

A mi familia por su constante atención y siempre estar pendientes del avance de mi carrera, a mis amigos y compañeros que de una u otra manera me ayudaron en tiempos difíciles.

A todas las personas que colaboraron y contribuyeron en la realización de este proyecto.

A Gaby quien estuvo a mi lado la mayor parte de mi periodo en la ESPOCH.

Hermen Patricio Díaz Barahona

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por habernos guiado y acompañado a lo largo de nuestra carrera por darnos la fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarnos una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A nuestros padres por ser el pilar fundamental, además de brindarnos su tiempo, atención, dedicación y apoyo, nunca nos dejaron solos en esta etapa estudiantil.

A nuestros hermanos por ser parte importante en nuestras vidas y representar la unidad familiar.

A la ESPOCH, Facultad de Mecánica y Escuela de Ingeniería de Mantenimiento instituciones que nos aceptaron y nos abrieron las puertas para capacitarnos y obtener conocimientos para desempeñarnos de la mejor manera en nuestra futura vida profesional.

A los docentes quienes con sus conocimientos y consejos nos guiaron por la senda del correcto aprendizaje.

Al director y asesor de tesis, que gracias a su ayuda se logró culminar con éxito esta tesis.

Deysi Gabriela Calle Cornejo y Hermen Patricio Díaz Barahona

CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN

| | | |
|-------|---|---|
| 1.1 | Antecedentes | 1 |
| 1.2 | Justificación técnico - económica | 1 |
| 1.3 | Objetivos | 2 |
| 1.3.1 | <i>Objetivo general</i> | 2 |
| 1.3.2 | <i>Objetivos específicos:</i> | 2 |

2. MARCO TEÓRICO

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Motor de inducción trifásico tipo “Jaula de ardilla” | 3 |
| 2.2 | Principio de funcionamiento | 3 |
| 2.3 | Partes constitutivas del motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla | 5 |
| 2.4 | Circuito equivalente de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla | 8 |
| 2.5 | Conexión en motores eléctricos de inducción trifásicos con rotor tipo “Jaula de ardilla” | 11 |
| 2.5.1 | <i>Normalización.</i> | 12 |
| 2.5.2 | <i>Conexión de motores trifásicos.</i> | 12 |
| 2.6 | Parámetros de buen funcionamiento de motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos | 13 |
| 2.6.1 | <i>Onda de campo de un devanado trifásico.</i> | 13 |
| 2.6.2 | <i>Distorsión armónica.</i> | 15 |
| 2.6.3 | <i>Secuencia armónica.</i> | 15 |
| 2.7 | Detección del número de barras rotas por modelación matemática | 16 |
| 2.8 | Principales modos de fallo en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos | 16 |
| 2.8.1 | <i>Asimetría del motor.</i> | 17 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.8.2 | <i>Asimetría en el entrehierro.</i> | 17 |
| 2.8.3 | <i>Asimetría en el estator.</i> | 18 |
| 2.8.4 | <i>Averías en los rodamientos.</i> | 19 |
| 2.9 | Mantenimiento predictivo en motores trifásicos | 20 |
| 2.9.1 | <i>Método de eficiencia energética eléctrica.</i> | 20 |
| 2.10 | Características y especificaciones del equipo Fluke 435 serie II. | 21 |
| 2.10.1 | <i>Características de funcionamiento.</i> | 21 |
| 2.10.2 | <i>Características de seguridad.</i> | 21 |
| 2.10.3 | <i>Medidas eléctrica.</i> | 22 |
| 2.10.4 | <i>Características de entrada</i> | 22 |
| 2.10.5 | <i>Modos y métodos de medida</i> | 23 |
| 2.10.6 | <i>Combinaciones de cableado</i> | 23 |
| 2.10.7 | <i>Normas del equipo de eficiencia energética.</i> | 24 |
| 2.10.8 | <i>Seguridad</i> | 24 |
| 2.11 | Formas de mediciones con el equipo de eficiencia energética. | 24 |
| 2.11.1 | <i>Armónicos.</i> | 24 |
| | | |
| 3. | ADQUISICIÓN DE DATOS EN DIFERENTES CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR | |
| 3.1 | Etapas de la toma de datos. | 30 |
| 3.2 | Identificación de la conexión. | 33 |
| 3.3 | Determinar los puntos de medición. | 34 |
| 3.4 | Equipos necesarios para la medición | 35 |
| 3.5 | Aplicación de las normas. | 36 |
| 3.6 | Toma de mediciones. | 38 |
| 3.7 | Registro. | 40 |
| 3.7.1 | <i>Motor en condiciones normales.</i> | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.7.2 | <i>Motor con falla (excentricidad).</i> | 45 |
| 3.7.3 | <i>Motor con falla (asimetría rotor).</i> | 48 |
| 3.8 | Espectros de corriente | 51 |
| 3.8.1 | <i>Medición con un motor en condiciones normales.</i> | 51 |
| 3.8.2 | <i>Motor con falla (excentricidad).</i> | 52 |
| 3.8.3 | <i>Motor con falla (asimetría rotor).</i> | 53 |
| 4. | ANÁLISIS DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE MODOS DE FALLO DEL MOTOR | |
| 4.1 | Interpretación de datos. | 54 |
| 4.2 | Comparación entre datos obtenidos y parámetros de buen funcionamiento de los motores. | 55 |
| 4.3 | Modos de fallo presentados | 56 |
| 4.4 | Causas de los modos de fallos. | 56 |
| 4.4.1 | <i>Excentricidad.</i> | 56 |
| 4.4.2 | <i>Asimetría de un rotor (rotura de barra).</i> | 58 |
| 4.5 | Consecuencias de los modos de fallo | 58 |
| 4.6 | Como corregir los modos de fallo | 60 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| 5.1 | Conclusiones. | 61 |
| 5.2 | Recomendaciones. | 62 |

BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| 1 Conexión de motores..... | 12 |
| 2 Combinación de conexiones..... | 12 |
| 3 Secuencia armónica..... | 15 |
| 4 Características de entrada..... | 22 |
| 5 Modos de medida..... | 23 |
| 6 Combinaciones de cableado..... | 23 |
| 7 Normas del equipo de eficiencia energética..... | 24 |
| 8 Seguridad..... | 24 |
| 9 Número de gráficos de barras..... | 26 |
| 10 Teclas de función disponibles para el filtrado..... | 26 |
| 11 Teclas de función disponibles para el multímetro..... | 27 |
| 12 Teclas de función disponibles para tendencia..... | 28 |
| 13 Tabla de frecuencias de los armónicos..... | 29 |
| 14 Características del motor..... | 31 |
| 15 Límites de armónicos..... | 38 |
| 16 Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase A)..... | 43 |
| 17 Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase B)..... | 44 |
| 18 Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase C)..... | 44 |
| 19 Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase A)..... | 47 |
| 20 Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase B)..... | 47 |
| 21 Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase C)..... | 48 |
| 22 Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase A)..... | 50 |
| 23 Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase B)..... | 50 |
| 24 Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase C)..... | 50 |
| 25 Medidas de picos de los armónicos del motor en condiciones normales..... | 51 |
| 26 Medidas de picos altos del motor en condiciones normales..... | 52 |
| 27 Medidas de picos de los armónicos del motor con excentricidad..... | 52 |
| 28 Medidas de picos altos del motor con excentricidad..... | 52 |
| 29 Medidas de picos de los armónicos del motor con asimetría..... | 53 |
| 30 Medidas de picos altos del motor con asimetría..... | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1 Motor de inducción trifásico tipo “Jaula de ardilla” | 3 |
| 2 Campos magnéticos del estator y rotor de un motor | 4 |
| 3 Estator del motor trifásico..... | 5 |
| 4 Carcasa del motor trifásico | 6 |
| 5 Núcleo del motor trifásico | 6 |
| 6 Devanado del motor trifásico..... | 6 |
| 7 Rotor del motor trifásico..... | 7 |
| 8 Eje del motor trifásico..... | 7 |
| 9 Barras de un motor trifásico..... | 7 |
| 10 Circuito equivalente | 9 |
| 11 Circuito equivalente con resistencia de carga..... | 10 |
| 12 Circuito equivalente a un transformador | 10 |
| 13 Excentricidad estática | 17 |
| 14 Excentricidad dinámica..... | 18 |
| 15 Equipo Fluke 435 serie II..... | 21 |
| 16 Menú del equipo de calidad de energía | 25 |
| 17 Barra de armónicos | 25 |
| 18 Multímetro de armónicos..... | 27 |
| 19 Tendencia de armónicos | 28 |
| 20 Motor trifásico Weg..... | 31 |
| 21 Placa del motor | 31 |
| 22 Tapas de excentricidad..... | 32 |
| 23 Rotor del motor trifásico..... | 32 |
| 24 Motor acoplado al freno magnético | 33 |
| 25 Conexión estrella | 33 |
| 26 Conexión triángulo | 34 |
| 27 Configuración del equipo..... | 34 |
| 28 Pinzas amperimétricas de baja intensidad | 35 |
| 29 Puntos de medición de la corriente | 35 |
| 30 Osciloscopio de dos canales | 36 |
| 31 Motor acoplado al freno magnético | 39 |

| | | |
|----|--|----|
| 32 | Toma de mediciones con los equipos | 39 |
| 33 | Calibración de los equipos | 40 |
| 34 | Rotor perforado | 40 |
| 35 | Forma de onda de la corriente en condiciones normales (3fases) | 41 |
| 36 | Forma de onda de corriente (Fase A) | 42 |
| 37 | Forma de onda de corriente (Fase B) | 42 |
| 38 | Forma de onda de corriente (Fase C) | 42 |
| 39 | Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase A) | 43 |
| 40 | Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase B) | 44 |
| 41 | Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase C) | 44 |
| 42 | Forma de onda de la corriente del motor con excentricidad (3fases) | 45 |
| 43 | Forma de onda de corriente (Fase A) | 45 |
| 44 | Forma de onda de corriente (Fase B) | 46 |
| 45 | Forma de onda de corriente (Fase C) | 46 |
| 46 | Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase A) | 46 |
| 47 | Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase B) | 47 |
| 48 | Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase C) | 47 |
| 49 | Forma de onda de corriente del motor con asimetría (3 fases) | 48 |
| 50 | Forma de onda de corriente (Fase A) | 48 |
| 51 | Forma de onda de corriente (Fase B) | 49 |
| 52 | Forma de onda de corriente (Fase C) | 49 |
| 53 | Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase A) | 49 |
| 54 | Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase B) | 50 |
| 55 | Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase C) | 50 |
| 56 | Espectro de corriente del motor en condiciones normales | 51 |
| 57 | Espectro de corriente del motor con excentricidad | 52 |
| 58 | Espectro de corriente del motor con asimetría | 53 |

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|------|---|
| IEC | Comisión Electrotécnica Internacional |
| NEMA | Asociación de Fabricantes Eléctricos Nacionales |
| THD | Distorsión armónica de corriente |
| MAJA | Motor asincrónico tipo “Jaula de ardilla” |

RESUMEN

Se analizó la señal de la corriente eléctrica de un motor trifásico tipo jaula de ardilla, adquiriendo e interpretando datos de armónicos, su nivel y frecuencia así como la forma del espectro para poder detectar modos de fallos presentes en los motores.

Los motores trifásicos tipo “Jaula de ardilla” son los más utilizados en la industria, por esta razón, detectar un modo de falla antes de que se produzca un paro inesperado es muy importante; se utilizará el equipo de análisis de calidad y eficiencia energética para medir el nivel de los armónicos y un osciloscopio para ver el espectro de la corriente.

Estas mediciones se realizaron en las conexiones de un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla del laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH; a éste se le modificó de tal manera que se puedan introducir las fallas y así analizar el espectro de la corriente para identificar las señales presentes a causas de los fallos efectuados.

Después de realizar y registrar las mediciones del motor en condiciones normales y con las modificaciones geométricas y de masa, se analizaron los resultados obtenidos y se determinaron características propias que identifican la excentricidad y asimetría del entrehierro que son los modos de fallo inducidos en el motor.

Los espectros y los niveles de armónicos cambian de acuerdo al modo de fallo, estas características propias de los modos de fallo ayudarán a identificarlos y prevenir los no deseados paros inesperados.

ABSTRACT

It was analyzed the signal of the electric current of a three-phase motor type squirrel cage, acquiring and interpreting harmonic data, its level and frequency as well as the part of a spectrum in order to detect fault modes existing in the engine.

The three-phase motors type "Squirrel cage" are the most commonly used by the industry, for this reason, detecting a failure mode before an unexpected break occurs is important; it will be used the analysis of quality and energy efficiency to measure the level of the harmonics and an oscilloscope to see the current spectrum.

The measures were carried out in the connections of the three-phase induction motor type squirrel cage of the Predictive Maintenance Laboratory from the Faculty of Mechanics at ESPOCH; the motor was modified, so that the failures could be introduced and the current spectrum was analyzed to identify the present signals caused by the malfunctioning of the motor.

After making and recording the measurements of the motor under normal working conditions, and with the geometric and mass modifications, the obtained results were analyzed and the own characteristics were determined to identify the eccentricity and asymmetry of the between iron which the failure modes are induced in the motor.

The spectrum and the harmonic levels change according to the failure mode, these own characteristics of the failure modes will help to identify and prevent the unwanted break downs.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Para la realización de prácticas por parte de los estudiantes se creó e instaló el laboratorio de Máquinas Eléctricas en la Facultad de Mecánica, con una serie de equipos, elementos y accesorios con el fin de proporcionar a los estudiantes una preparación práctica para la vida profesional.

Estos equipos, elementos y accesorios se deben ir actualizando a medida que la tecnología va avanzando con el paso del tiempo es por esta razón que para el cálculo, análisis, medición, de la eficiencia y de la calidad energética existen equipos capaces de otorgar medidas confiables y de alta calidad para la medición de algunos fenómenos presentes en las magnitudes eléctricas.

Con la correcta interpretación y análisis de estos fenómenos los estudiantes estarán más capacitados para su vida en la industria brindando al país una mejor manera de afrontar los problemas eléctricos aportando un enorme desarrollo al mantenimiento y a la industria.

1.2 Justificación técnico - económica

Los estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento deben estar actualizados con los conocimientos tanto teóricos como prácticos indispensables para el desarrollo de su vida profesional, es así que con la determinación de los modos de falla mediante el análisis espectral de la corriente eléctrica en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos, se dará un paso importante en el mantenimiento evitando pérdidas de producción en las empresas.

Los motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos son los más comunes y mayormente utilizados en la industria por su fabricación y costo, conocer los modos de falla causados por el desequilibrio en la corriente aportaría en gran medida a la

industria del país y de esta manera mejorar la producción y evitar posibles pérdidas en la producción.

Para la medición de los fenómenos presentados en la corriente eléctrica es necesario utilizar un analizador de la eficiencia y de la calidad de la energía con mediciones confiables, de calidad y que presente software de alta confiabilidad.

Para la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, la Facultad de Mecánica y la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo la utilización de un equipo de estas características y realizar este tema de tesis es una manera de involucrarse en las expectativas de la industria aportando de gran medida al crecimiento de la región y del país.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Detectar los modos de falla mediante el análisis espectral de la corriente eléctrica en los motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Aprender el correcto uso y manejo del equipo de medición de eficiencia y calidad energética.

Conocer el funcionamiento y los parámetros de los motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos.

Modificar las medidas geométricas y de masa en el motor.

Medir y analizar la distorsión armónica de la corriente eléctrica en los motores tipo jaula de ardilla trifásicos.

Determinar cómo afecta la distorsión de la corriente en los conductores de los bobinados del motor.

Analizar los modos de fallo que se puedan presentar en los motores.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Motor de inducción trifásico tipo “Jaula de ardilla”

El motor de inducción o motor asíncrono es el motor eléctrico más ampliamente utilizado en la industria, abarcando aproximadamente un 85% del total de las cargas eléctricas. Consta de una parte fija, denominada estator, y una parte giratoria, denominada rotor, incorporando cada una de ellas una serie de devanados formados por un conductor eléctrico, y separadas por una capa de aire denominada entrehierro. A diferencia de la máquina de corriente continua y de la máquina síncrona, en este caso ambos devanados son alimentados por corriente alterna sinusoidal. Esta corriente alterna es suministrada al estator directamente de la red de alimentación, mientras que al devanado del rotor se le suministra por el fenómeno de inducción electromagnética.

Figura 1. Motor de inducción trifásico tipo “Jaula de ardilla”



Fuente: (Wikipedia)

2.2 Principio de funcionamiento

La máquina de inducción en reposo con el devanado estatórico conectado a la red trifásica y el rotórico en cortocircuito es equivalente a un transformador estático con el secundario cortocircuitado. El flujo magnético producido por la corriente alterna del estator genera un campo magnético rotativo que corta los conductores del rotor obteniéndose sobre ellos, una fuerza electromotriz inducida con lo que circulara por el rotor una determinada intensidad. Las corrientes inducidas en el rotor generan fuerzas

electromotrices y pares que tienden a arrastrar el motor en el mismo sentido que gira el campo.

La explicación física es que, al funcionar la maquina con el rotor en cortocircuito, basta una pequeña fuerza electromotriz rotórica para ser circular fuertes intensidades por estos devanados, capaces de generar el par necesario para mantener la carga.

La inducción magnética el estator del motor se desplaza de forma circular. Esa velocidad de giro nos da la velocidad de sincronismo del motor n_s , que es función de la frecuencia f_1 de la red eléctrica que alimenta el motor.

Figura 2. Campos magnéticos del estator y rotor de un motor



Fuente: (Carpio)

La velocidad de giro sincrónica se designará como, n_s es decir la del campo creado por las corrientes trifásicas del estator. Siendo su valor en rpm:

$$n_s = \frac{60 f_1}{p} \quad (1)$$

Dónde:

f_1 : Frecuencia de alimentación del estator

p : Número de pares de polos

El campo magnético giratorio induce en el rotor fuerzas electromotrices, y debido a que las barras que constituyen la jaula de ardilla forman un circuito cerrado, se generan corrientes eléctricas que obligan al rotor a moverse en el sentido de giro del campo

magnético del estator. La velocidad de giro del rotor n_m es algo menor a la velocidad de sincronismo n_s (valores menores de un 5 % por lo general), dando lugar al concepto de deslizamiento s : (DUQUE, 2005)

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

2.3 Partes constitutivas del motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla

Las partes principales del motor de corriente alterna tipo jaula de ardilla son el rotor y el estator.

Estator

Figura 3. Estator del motor trifásico



Fuente: (Científicos)

La inducción magnética del estator del motor se desplaza de forma circular. Esa velocidad de giro nos da la velocidad de sincronismo del motor n_s que es función de la frecuencia f_1 de la red eléctrica que alimenta el motor.

Carcasa

Es la estructura que sirve como soporte del motor, por lo general se construye de hierro fundido, acero o aluminio, es resistente a la corrosión y en la mayoría de los casos presentan aletas que permiten un enfriamiento mucho más rápido del motor (ver figura 4).

Núcleo

El núcleo magnético del estator está compuesto de chapas de acero magnético con tratamiento térmico para reducir al mínimo las pérdidas en el hierro (ver figura 5).

Figura 4. Carcasa del motor trifásico



Fuente: (Tuveras.com)

Figura 5. Núcleo del motor trifásico



Fuente: (Carpio)

Devanado

El devanado del estator está compuesto por tres bobinas con iguales características, una por fase, formando un sistema trifásico para conectarse a la red de suministro. El material utilizado es cobre.

Figura 6. Devanado del motor trifásico



Fuente: (Systems)

Rotor

El rotor es la parte móvil del motor, la que realiza el movimiento circular y de empuje, en el cual se inducen la corriente por medio del estator, está compuesto por barras en cortocircuito parecidas a una jaula de ardilla de ahí su nombre.

Figura 7. Rotor del motor trifásico



Fuente: (Tuveras.com)

Eje

El eje del motor también conocido como flecha, es el encargado de transmitir la potencia mecánica desarrollada por motor y recibe un tratamiento térmico para evitar problemas con deformación y fatiga.

Figura 8. Eje del motor trifásico

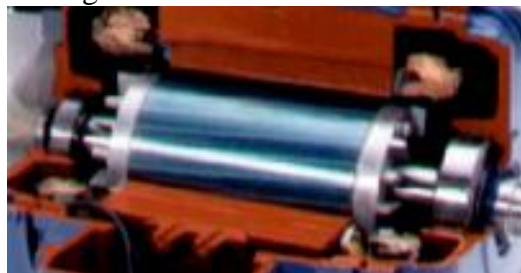


Fuente: (Watts-RC)

Barras y anillos de cortocircuito

Estas son fabricadas con aluminio, cobre o bronce y fundidos a presión en una pieza única. (Tuveras.com)

Figura 9. Barras de un motor trifásico



Fuente: (Ezra)

2.4 Circuito equivalente de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla

El circuito equivalente de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla se puede deducir del de un transformador debido a la similitud existente entre el principio de funcionamiento de ambas máquinas.

Se presentan resistencias de paso a la corriente tanto en los devanados el estator como del rotor R_s y R_r , respectivamente. Además, flujos de dispersión L_s y L_r en estado estacionario, dando lugar a reactancias:

$$X_s = 2\pi f_1 L_s \quad (3)$$

Dónde:

X_s es la reactancia del estator.

f_1 es la frecuencia fundamental.

$$X_r = 2\pi f_1 L_r \quad (4)$$

Dónde:

X_r es la reactancia del rotor.

f_1 es la frecuencia fundamental.

Al girar el rotor, se tiene que modelar el efecto del flujo de dispersión por lo cual se obtiene una reactancia.

$$X_m = s X_r \quad (5)$$

Dónde:

S es el deslizamiento.

Y la fuerza electromotriz inducida en esas circunstancias:

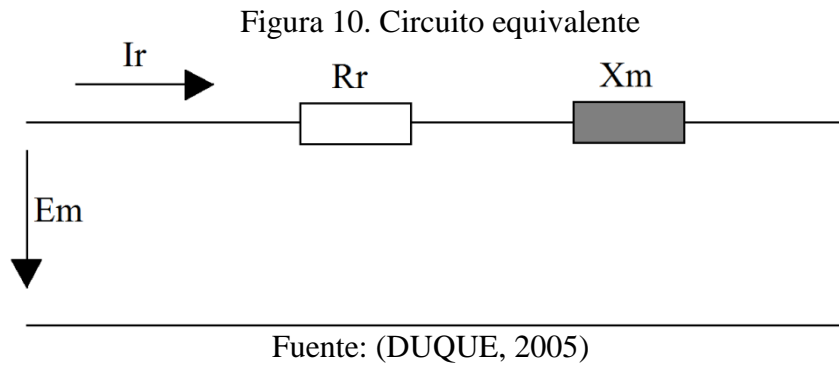
$$E_m = s E_r \quad (6)$$

Dónde:

E_m es la fuerza electromotriz.

E_r es la fuerza electromotriz inducida del rotor.

Por lo que el circuito equivalente del rotor en movimiento está representado en la figura:



Con el circuito equivalente se puede obtener la intensidad que circula por el rotor en movimiento:

$$I_r = \frac{s E_r}{\sqrt{R_r^2 + (sX_r)^2}} = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_r^2}} \quad (7)$$

Dónde:

I_r es la intensidad del rotor.

R_r es la resistencia del rotor.

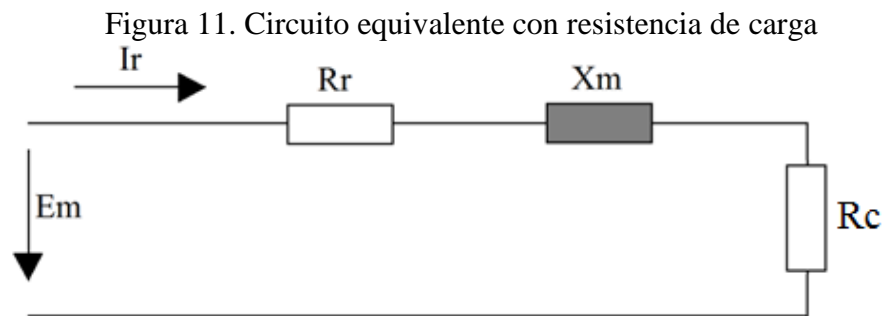
Se puede transformar la resistencia de esta ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{R_s}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s} = R_r + R_c \quad (8)$$

Dónde:

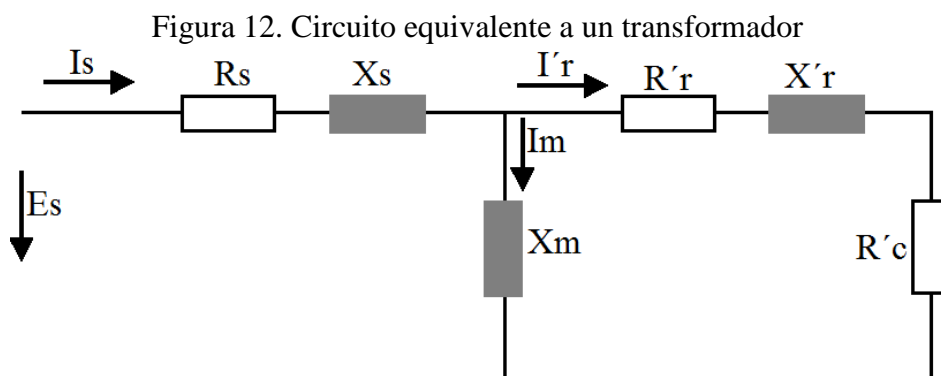
R_c se denomina a la resistencia de carga que es el valor de la carga mecánica que mueve el rotor la misma que varía de acuerdo a la velocidad puesto q si el rotor está en reposo R_c es nula.

Con la resistencia de carga se obtiene el siguiente circuito:



Fuente: (DUQUE, 2005)

El circuito equivalente se procede al igual como que si fuera un transformador reduciendo el secundario al primario (en el caso del motor del rotor al estator).



Fuente: (DUQUE, 2005)

Las magnitudes marcadas con tilde en el circuito representan a las correspondientes magnitudes reducidas al estator.

X_m , representa la reactancia de magnetización que, recorrida por la intensidad de magnetización I_m , provoca el flujo principal que inducirá sobre el rotor unas corrientes determinadas despreciables en un transformador pero en el caso del motor es lo contrario debido a que la reluctancia del aire es mucho mayor que la del hierro.

En el caso del transformador la reducción se realiza solo considerando simplemente su relación de transformación, pero en el caso del motor, el proceso es más complejo debido a que el número de fases del estator y del rotor no deben coincidir, y la influencia de los factores de devanado, que son factores reductores para tener en cuenta en las fuerzas electromotrices de las diversas espiras de los devanados, estas llevan un desfase entre si al estar distribuidas en las periferias del estator y rotor. (DUQUE, 2005)

La relación de transformación de tensiones en el motor de inducción es:

$$r_v = \frac{K_s N_s}{K_r N_r} \quad (9)$$

Dónde:

K_s y K_r son los factores de devanado de estator y rotor, respectivamente.

N_s y N_r son los números de espiras de estator y rotor, respectivamente.

Para las intensidades, La relación de transformación es:

$$r_i = \frac{m_r K_r N_r}{m_s K_s N_s} = \frac{m_r}{m_s r_v} \quad (10)$$

Dónde:

m_r y m_s son el número de fases del rotor y del estator, respectivamente.

Para las impedancias, la relación de transformación correspondiente será:

$$r_z = \frac{r_v}{r_i} \quad (11)$$

2.5 Conexión en motores eléctricos de inducción trifásicos con rotor tipo “Jaula de ardilla”

Las conexiones de los motores trifásicos tipo “Jaula de ardilla” se deben regir mediante normalización, a continuación se describe la misma.

2.5.1 Normalización. El instituto encargado de preparar, revisar y analizar las normas técnicas en la fabricación de motores eléctricos a nivel internacional es la Comisión Electrotécnica Internacional (I.E.C.), con sede en Suiza, y en los Estados Unidos de Norte América lo hace la Asociación de Fabricantes Eléctricos Nacionales (NEMA).

A nivel mundial los fabricantes de motores adoptan las normas de marcación de terminales de acuerdo con la normalización vigente en su respectivo país, derivadas principalmente de las normativas I.E.C. y NEMA. (DUQUE, 2005)

2.5.2 Conexión de motores trifásicos. En los motores eléctricos trifásicos con rotor Jaula de Ardilla podemos encontrar las conexiones que se ilustran en la tabla.

Conexión de motores

Tabla 1. Conexión de motores

| Ítem | Conexión | Cantidad de terminales de conexión |
|------|--------------------------|------------------------------------|
| 1 | Interior | 3 |
| 2 | Δ | 6 |
| 3 | Δ / Y | 6 |
| 4 | YY / Y | 9 |
| 5 | $\Delta \Delta / \Delta$ | 9 |
| 6 | YY / Y | 12 |
| 7 | $\Delta \Delta / \Delta$ | 12 |

Fuente: (Autores)

Combinación de conexiones

Tabla 2. Combinación de conexiones

| Simbología de la conexión | Descripción de la conexión | Observaciones |
|---------------------------|--|--|
| Δ / Y | Triangulo para la menor tensión estrella para la mayor tensión | Posibilita que el motor pueda arrancar en estrella triangula en menor tensión. También usada en motores de una sola tensión de servicio que arrancan en estrella triangulo |
| YY / Y | Estrella doble para la menor tensión estrella para la mayor tensión | |
| $\Delta \Delta / \Delta$ | Triangulo para la mayor tensión triangulo doble para la menor tensión | |

Fuente: (Autores)

2.6 Parámetros de buen funcionamiento de motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos.

2.6.1 Onda de campo de un devanado trifásico. De acuerdo con el teorema de Ferraris, si tenemos un devanado trifásico un devanado trifásico dispuesto sobre la corona estatórica, por el cual circula un sistema trifásico de corrientes simétricas, obtenemos un campo giratorio de amplitud máxima constante F_m y velocidad angular ω_1 , cuyo valor en un punto P, distante un ángulo θ desde el origen contando a partir del eje de la fase A, viene dada por la ecuación 12, y que girara a la velocidad del sincronismo.

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega_1 t - p\theta) \quad (12)$$

Dónde:

F_m es la amplitud máxima constante.

p es el número de polos.

Pero, en realidad, la distribución en el espacio de la fuerza magnetomotriz originada por cada fase no es sinusoidal, sino una onda rectangular en el caso de un devanado concentrado o una onda escalonada si, como ocurre en la realidad, el devanado está distribuido en ranuras y/o se realiza un acortamiento de paso. En series de Fourier de la onda de fuerza magnetomotriz nos permite afirmar que, del mismo modo que las ondas fundamentales dan lugar a un campo giratorio, también los campos armónicos de las tres fases darán lugar a campos giratorios armónicos de igual pulsación en el tiempo.

En un principio se puede considerar, un devanado trifásico en la que cada fase tiene una bobina concentrada. Para el armónico de orden h , la fuerza magnetomotriz en un punto distante un ángulo θ del eje de la fase a será la suma de las fuerzas magnetomotrices que en este punto determinan los armónicos de orden h de cada una de las fases, según:

$$F_h(\theta, t) = F_{hm} \left[\cos(\omega_1 t) \cos(h\theta) + \cos\left(\omega_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(h\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(h\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (13)$$

El factor h aparece solo en los términos que se refieren a la distribución en el espacio, pero no en los referentes al tiempo, al adquirir que las corrientes trifásicas son sinusoidales.

Para h=3 y para todos los armónicos múltiplos de 3, tenemos:

$$F_3(\theta, t) = F_{3m} \cos(3\theta) \left[\cos(\omega_1 t) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (14)$$

Para h=5

$$F_5(\theta, t) = F_{5m} \left[\cos(\omega_1 t) \cos(5\theta) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(5\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(5\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (15)$$

Esta expresión pone de manifiesto que la sucesión de fases en el espacio correspondiente al quinto armónico es inversa a la que corresponde a las componentes fundamentales, por lo que el campo resultante girará en sentido contrario al del campo fundamental.

Para h=7

$$F_7(\theta, t) = F_{7m} \left[\cos(\omega_1 t) \cos(7\theta) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(7\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(7\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (16)$$

Es decir, el orden de sucesión de las fases es el mismo que el fundamental, por lo que su campo resultante girará en igual sentido.

Procediendo de forma similar para los armónicos de orden superior, obtenemos que giran en sentido contrario al armónico fundamental los armónicos de orden $(6k - 1)$, siendo k un numero entero y en el mismo sentido que el fundamental los de orden $(6k + 1)$.

2.6.2 Distorsión armónica. Como la distorsión armónica de tensión es principalmente debida a la corriente de cargas no sinusoidales, la distorsión armónica de tensión y corriente, están fuertemente relacionadas.

La distorsión armónica de corriente requiere sobredimensionar una serie de componentes como transformadores y conductores.

El espectro armónico de corriente contiene principalmente 3°, 5°, 7° y componentes armónicas.

La distorsión armónica de corriente se puede expresar a partir del factor llamado (THD), el cual es usado para definir el efecto armónico sobre la corriente en un sistema de potencia.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (17)$$

Dónde:

$\sum_{h=2}^n I_h^2$: es la suma de los cuadrados de las amplitudes armónicas de corriente, en Dónde h es el orden armónico.

I_1 : es la amplitud de la corriente fundamental

2.6.3 Secuencia armónica. Las señales armónicas presentan distintas secuencias de fase que pueden ser; secuencia positiva y secuencia negativa. La secuencia positiva tiene la misma rotación de fases que la tensión trifásica aplicada mientras que la secuencia negativa tienen rotación de fases opuestas, mientras que las de secuencia cero u homopolar son llamadas armónicas triples. (DUQUE, 2005)

Tabla 3. Secuencia armónica

| Armónico | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | N |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|
| Secuencia | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | ... |

Fuente: (Autores)

2.7 Detección del número de barras rotas por modelación matemática

Otro método de estimación del número de barras rotas es el propuesto en (Hargis) a partir de la utilización de la siguiente ecuación empírica.

$$\Delta A \approx \frac{\sin \alpha}{2P(2\pi - \alpha)} \quad (18)$$

Dónde:

ΔA : valor definido como la relación en decibelios entre la magnitud de la banda lateral inferior respecto a la magnitud de la frecuencia de alimentación: $(1-2_s)f_1$

$$\alpha = \frac{2\pi n_{br}p}{R} \quad (19)$$

Dónde:

n_{br} : número de barras rotas

p : número de pares de polos

R : número de ranuras del rotor

Esta ecuación puede ser modificada, de forma que sea más fácil de utilizar, a partir de los datos recogidos directamente del análisis espectral, utilizando como medida de la amplitud de los armónicos el decibelio. Así se obtiene la expresión directa que proporciona el número estimado de barras rotas, n_{br} : (DUQUE, 2005)

$$n_{br} = \frac{2R}{\frac{\Delta A}{10^{20}} + 2p} \quad (20)$$

2.8 Principales modos de fallo en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos.

Cuando se presenta una falla en un motor ésta ocasiona armónicos en las corrientes de línea del motor, las cuales pueden ser identificados a través de sus componentes, entre las fallas más comunes tenemos:

2.8.1 *Asimetría del motor.* Es una de las fallas más frecuentes en el rotor, se da como consecuencia de la rotura de una barra o de un anillo de cortocircuito del rotor, cuando una pieza se rompe puede moverse a través del entrehierro y dañar la superficie de los devanados en el estator. Ocasionando una posible falla catastrófica que conllevaría a pérdidas de tiempo y dinero; por lo que la detección a tiempo de esta falla resultaría muy beneficioso.

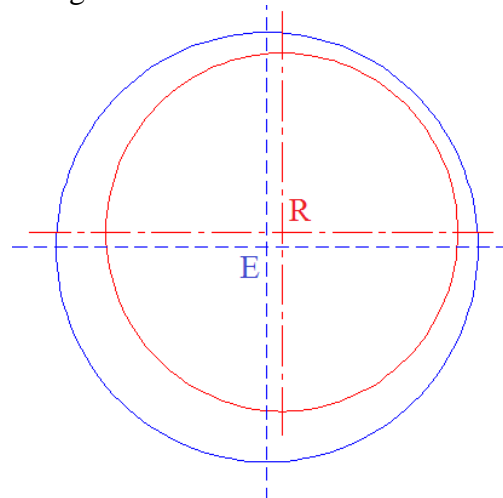
2.8.2 *Asimetría en el entrehierro.* Conocida como excentricidad del entrehierro es una condición de operación en la cual la distancia del entrehierro es distinta, debido a una atracción magnética o fuerzas radiales desbalanceadas, causando daños en el motor por fricción entre el estator y el rotor.

Existen tres tipos de excentricidades:

Excentricidad estática

Cuando existe un espacio mínimo fijo en el espacio del entrehierro o cuando el eje central del rotor no se encuentra en el mismo eje central del estator se presenta una excentricidad estática la cual ocasiona una atracción magnética desbalanceada estable en una dirección. Como consecuencia de esto el eje del rotor puede doblarse, producir desgaste en rodamientos.

Figura 13. Excentricidad estática



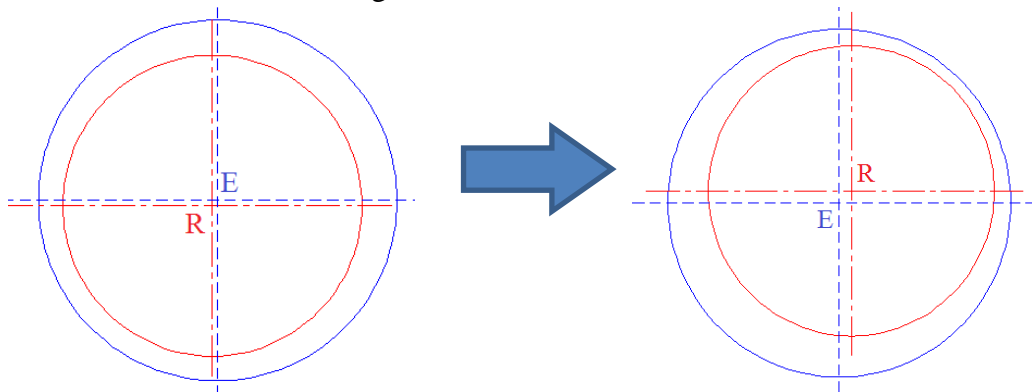
Fuente: (Autores)

Excentricidad dinámica

Se llama excentricidad dinámica cuando el motor tiene una mínima distancia del entrehierro y esta no permanece fija en su posición sino que varía con el tiempo.

Por lo que las inductancias de estator y rotor dependen del tiempo. Ya que las distancias entre centros y la posición angular del rotor en cada instante de tiempo hace que varíen las matrices.

Figura 14. Excentricidad dinámica



Fuente: (Autores)

Excentricidad mixta

Además de estas excentricidades existe la mixta que es la combinación de la excentricidad estática y dinámica que por lo general es lo más común que se encuentra en motores.

2.8.3 Asimetría en el estator. Los fallos en el estator en su gran mayoría tienen mucha relación con el aislamiento y son provocadas por la acción de distintos esfuerzos, entre los fallos y los esfuerzos más comunes tenemos:

Cortocircuito entre espiras

Cortocircuito entre bobinas de la misma fase

Cortocircuito entre fases

Derivación de fase a masa

Cortocircuito abierto en una fase

Cuando se produce un cortocircuito pueden aparecer grandes corrientes de circulación, por esta razón se debe localizar rápidamente estos fallos con el fin de conseguir evitar las mayores consecuencias en los motores.

Los esfuerzos que pueden provocar estos fallos son de diferentes tipos por ejemplo tenemos:

Esfuerzos térmicos: sobrecargas cíclicas

Esfuerzos eléctricos: dieléctricos, tracking, efecto corona, transitorios.

Esfuerzos mecánicos: vibraciones, chispeo.

Esfuerzos ambientales: humedad, suciedad, químicos, abrasión, objetos extraños.

2.8.4 *Averías en los rodamientos.* En los motores eléctricos la primera causa de avería son los fallos que se presentan en los rodamientos, dado que no funcionan bajo condiciones ideales, el mejor método de detectar las fallas en los rodamientos es el análisis vibracional o a su vez el método por ultrasonido, entre las principales causas de fallas de los rodamientos tenemos: (DÍAZ, 2011)

- Deficiente montaje
- Carga excesiva ya sea en estado activo o inactivo
- Mala lubricación
- Contaminación ambiental
- Error de dimensionamiento
- Paso de corriente eléctrica
- Desbalanceo
- Desalienación de acoples mecánicos
- Mala selección del rodamiento

2.9 Mantenimiento predictivo en motores trifásicos

El mantenimiento predictivo es una herramienta para evitar los paros imprevistos en las empresas y por lo tanto consecuencias como pérdidas de producción y dinero, el uso de esta herramienta se está incrementando pues se puede detectar si en algún punto en el futuro algún elemento de un equipo va a tener un fallo, mediante la utilización de diversos métodos entre ellos tenemos.

2.9.1 Método de eficiencia energética eléctrica. Mediante la teoría de máquinas eléctricas se ha demostrado que las asimetrías en el estator y rotor originan corrientes con una secuencia finita de armónicos. Bajo condiciones normales de funcionamiento las tensiones en los devanados trifásicos del estator inducen corrientes en las barras del rotor, que a su vez originan campos giratorios de sentido directo e inverso en el entrehierro. Si los devanados del rotor son simétricos, los campos giratorios directos se suman y por el contrario los campos inversos se cancelan. Pero si en el rotor existiera alguna falla o asimetría, el componente giratorio inverso no se cancela y la detección de este componente es la base para el descubrimiento de potenciales fallos en las máquinas rotativas.

La existencia de una avería o fallo en la maquina trifásica puede ser detectada a través del análisis de la corriente eléctrica como es el caso de asimetrías en el estator y el rotor, la excentricidad ya sea estática y dinámica que se caracteriza por la aparición de componentes de alta frecuencia en el espectro de la corriente de alimentación, además la excentricidad mixta tiene componentes armónicos de baja frecuencia que podrían aparecer en el espectro de la corriente del estator.

La detección de fallos en los rodamientos se presenta con armónicos específicos en el espectro de la corriente de alimentación, al igual que sucede con otros problemas mecánicos del motor, de la maquina accionada o de la transmisión.

Las ventajas de tiene el análisis de la corriente con el medidor de eficiencia energética sobre los otros métodos de mantenimiento predictivo en motores trifásicos jaula de ardilla son, la utilización de los sensores y pinzas amperimétricas y para montaje pues a diferencia del análisis vibracional el método de análisis de corriente no se ve

influenciado por vibraciones transmitidas de máquinas adyacentes además sus sensores deben ser colocados cuidadosamente. (DUQUE, 2005)

2.10 Características y especificaciones del equipo Fluke 435 serie II.

El equipo de medición de la calidad y eficiencia energética, ofrece un conjunto potente y completo de medidas para monitorear la calidad de la energía eléctrica.

Figura 15. Equipo Fluke 435 serie II



Fuente: (Fluke)

2.10.1 Características de funcionamiento. Fluke garantiza las características expresadas en valores numéricos con la tolerancia establecida. Los valores numéricos sin tolerancia son los normales y representan las características de un instrumento de gama media sin incluir los accesorios. El analizador cumple con la precisión especificada de 30 minutos y con dos adquisiciones completas tras el encendido. A menos que se indique lo contrario, todas las especificaciones de funcionamiento son válidas bajo las restricciones detalladas en el apartado "Condiciones ambientales".

Las especificaciones se basan en un ciclo de calibración anual.





2.10.2 Características de seguridad. El analizador se ha diseñado y probado conforme a la norma EN61010-1 2a edición (2001), para instrumentos con requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medida, control de las medidas y uso en laboratorio, Clase III, Grado 2 de contaminación.

La utilización de este analizador y sus accesorios de un modo distinto al especificado por el fabricante puede afectar a la protección proporcionada por el equipo.

2.10.3 Medidas eléctrica. Las siguientes especificaciones del instrumento se han verificado utilizando la tabla de “comprobación de la implementación”, según lo descrito en el capítulo 6-2 de la norma 61000-4-30, 2a edición. (Fluke, 2013)

2.10.4 Características de entrada

Tabla 4. Características de entrada

| Entradas de tensión | |
|---|--|
| Número de entradas | 4(3 fases + neutro) acopladas en CC |
|  Tensión máxima de entrada | 1.000 Vrms |
|  Rango de tensión nominal | Se puede seleccionar entre 1 V y 1.000 V según IEC61000-4-30 |
|  Tensión máxima de medida de picos | 6 kV (modo de transitorios solamente) |
| Impedancia de entrada | 4 MΩ // 5 pF |
| Ancho de banda | > 10 kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios |
| Factor de escala | 1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable |
| Entradas de corriente | |
| Número de entradas | 4(3 fases + neutro) acopladas en CC o CA |
|  Tipo | Pinza en transformador de corriente con salida mV/A o i430flex-TF |
| Rango | 0,5 Arms a 600 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 10x) 5 Arms a 6.000 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 1x) 0,1 mV/A a 1 V/A y personalizado para su uso con pinzas de CA o CC opcionales Nota: la posición de sensibilidad x10 ofrece más resolución, pero menos rango. Sólo se admiten señales de CA; los componentes de CC se bloquean. |
| Impedancia de entrada | 1 MΩ |
| Ancho de banda | >10 kHz |
| Factor de escala | 1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1 10.000:1 y variable |
| Frecuencia nominal | 435-II: 50 Hz, 60 Hz |

Fuente: (Fluke, 2013)

2.10.5 Modos y métodos de medida

Tabla 5. Modos de medida

| | |
|---------------------------|--|
| Armónicos CC, 1 ... 50 | Voltios de armónicos, THD, amperios de armónicos, amperios de factor K, vatios de armónicos, vatios de THd, vatios de factor K, voltios de interarmónicos, amperios de interarmónicos, Vrms, Arms (relativo a fundamental o a rms total) |
| Armónicos | Cálculo de medidas del grupo de armónicos ininterrumpidos de tensión y amperios de 10/12 ciclos conforme a la norma IEC 61000-4-7 |

Fuente: (Fluke, 2013)

2.10.6 Combinaciones de cableado

Tabla 6. Combinaciones de cableado

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1ø + neutro | Monofásico con neutro |
| 1ø fase dividida | Fase dividida |
| 1ø tierra interrumpida sin neutro | Sistema monofásico con tensiones bifásicas sin neutro |
| 3ø en estrella | Sistema trifásico en estrella de cuatro hilos |
| 3ø en triángulo | Sistema trifásico en triángulo de tres hilos |
| 3ø tierra interrumpida | Sistema trifásico en estrella sin neutro |
| 3ø línea alta | Sistema trifásico en triángulo de cuatro hilos con línea alta central derivada |
| 3ø línea abierta | Sistema en triángulo abierto de tres hilos con 2 bobinas de transformador |
| 2 elementos | Sistema trifásico de tres hilos sin sensor de corriente en la fase L2/B (método de medidas de 2 vatios) |
| 2½ elementos | Sistema trifásico de cuatro hilos sin sensor de tensión en la fase L2/B |
| Eficiencia de inversores | Entrada de corriente y tensión de CC con potencia de salida de CA (se muestra y se selecciona automáticamente en el modo de eficiencia de inversores) |

Fuente: (Fluke, 2013)

2.10.7 Normas del equipo de eficiencia energética.


Tabla 7. Normas del equipo de eficiencia energética

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Métodos de medida utilizados | IEC61000-4-30 2a edición clase A |
| Precisión de las medidas | Fluke 435-II-II IEC61000-4-30 Clase A |
| Calidad de la energía eléctrica | EN50160 |
| Parpadeo | IEC 61000-4-15 |
| Armónicos | IEC 61000-4-7 |
| V/A/Hz Barco | MIL-STD-1399-300B |

Fuente: (Fluke, 2013)

2.10.8 Seguridad

Tabla 8. Seguridad

| | |
|---|---|
|  Conformidad con | IEC/EN61010-1-2001, CAN/CSA C22.2 N.º 61010-1-04 (incluida homologación cCSAus), UL std N.º 61010-1, Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, de control y para uso en laboratorio, Parte 1: Requisitos generales. Categoría de seguridad: 600 V CAT IV 1.000 V CAT III Grado 2 de contaminación |
|---|---|

Fuente: (Fluke, 2013)

2.11 Formas de mediciones con el equipo de eficiencia energética.

2.11.1 Armónicos. Armónicos mide y registra armónicos e interarmónicos hasta el 50°. Se miden los datos relacionados, como componentes de CC, THD (distorsión total por armónicos) y factor K. Los armónicos son distorsiones periódicas de las ondas sinusoidales de potencia, corriente o tensión. Una forma de onda puede considerarse una combinación de varias ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y magnitudes. La forma en que estos componentes afectan a la señal es el parámetro de medida. Las lecturas pueden mostrarse como porcentaje del fundamental, como porcentaje de todos los armónicos combinados (valor rms) o como valor rms.

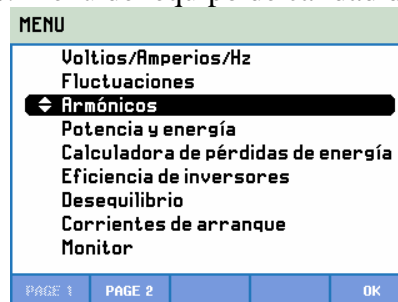
Los resultados se pueden visualizar en una pantalla de gráfico de barras, una pantalla de multímetro o una pantalla de tendencias. La presencia de armónicos suele ser el resultado de cargas no lineales como suministros eléctricos conmutados en ordenadores, televisores y motores de velocidad ajustable.

Los armónicos pueden causar el sobrecalentamiento de los transformadores, conductores y motores. (Fluke, 2013)

Pantalla de gráficos de barras

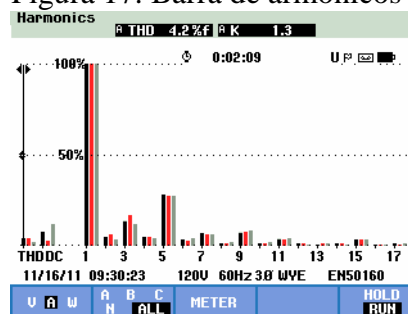
Para acceder a la pantalla de gráficos de barras de Armónicos:

Figura 16. Menú del equipo de calidad de energía



Fuente: (Fluke, 2013)

Figura 17. Barra de armónicos



Fuente: (Fluke, 2013)

La pantalla de gráficos de barras muestra el porcentaje de contribución de cada uno de los componentes relacionados con la señal total. Una señal sin distorsión debe mostrar un 1er armónico (= el fundamental) al 100% mientras los otros están a cero: en la práctica, esto no ocurrirá, puesto que siempre hay una determinada cantidad de distorsión, lo que provoca armónicos más altos.

Una onda sinusoidal pura se distorsiona cuando se le añaden componentes de frecuencia más alta. La distorsión se representa mediante el porcentaje de THD. La pantalla puede mostrar también el porcentaje del componente de CC y del factor K. El factor K se mide para la corriente y la potencia, y se muestra en el encabezado de la pantalla. Es un número que cuantifica la sobrecarga potencial en transformadores debida a corrientes de armónicos.

Los armónicos de orden superior influyen en el factor K más que los armónicos de orden bajo.

En la siguiente tabla se muestra el número de gráficos de barras mostrados simultáneamente en una pantalla:

Tabla 9. Número de gráficos de barras

| | Armónicos | Armónicos e interarmónicos |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Pantalla de todas las fases | 1 ... 17 | 1 ... 9 |
| Pantalla de una fase | 1 ... 50 | 1 ... 25 |

Fuente: (Fluke, 2013)

Filtrado.

A la hora de medir armónicos con interarmónicos desactivados, se usa el grupo de armónicos y un filtro de suavizado activo de 1,5 s. A la hora de medir armónicos con interarmónicos activados, se usan un subgrupo de armónicos y un subgrupo centrado de interarmónicos y no se activa ningún filtro. Consulte IEC61000-4-7 para obtener información sobre agrupación.

Teclas de función disponibles:

Tabla 10. Teclas de función disponibles para el filtrado

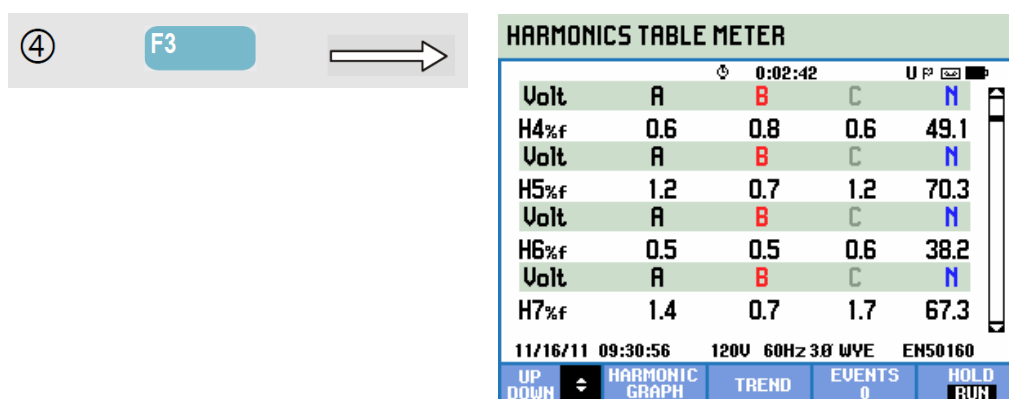
| | |
|----|--|
| F1 | Selección del tipo de armónicos: tensión, corriente o potencia real (vatios). Los armónicos de potencia pueden tener polaridad positiva y negativa. |
| F2 | Selección del conjunto de formas de onda que se va a utilizar: A (L1), B (L2), C (L3), N (neutro) o ALL |
| F3 | Acceso a la pantalla de multímetro. |
| F4 | Cambio entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida. |

Fuente: (Fluke, 2013)

Pantalla de multímetro

Para acceder a la pantalla de multímetro de armónicos:

Figura 18. Multímetro de armónicos



Fuente: (Fluke, 2013)

En la tabla de eventos, a la que se accede con la tecla de función F4, se enumeran todos los traspasos de umbral de tensiones de fase. Se pueden utilizar umbrales con estándares internacionales o valores definidos por el usuario. Para ajustar el umbral, pulse la tecla SETUP y, después, seleccione la opción “Límites”.

Teclas de función disponibles:

Tabla 11. Teclas de función disponibles para el multímetro

| | |
|----|--|
| F1 | Las teclas de flecha arriba/abajo se asignan para desplazarse por la pantalla de multímetro. |
| F2 | Retorno a la pantalla de gráficos de barras |
| F3 | Acceso a la pantalla de tendencia. Para obtener una descripción, consulte más abajo. |
| F4 | Acceso a las tablas de eventos. |
| F5 | Cambio entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida. |

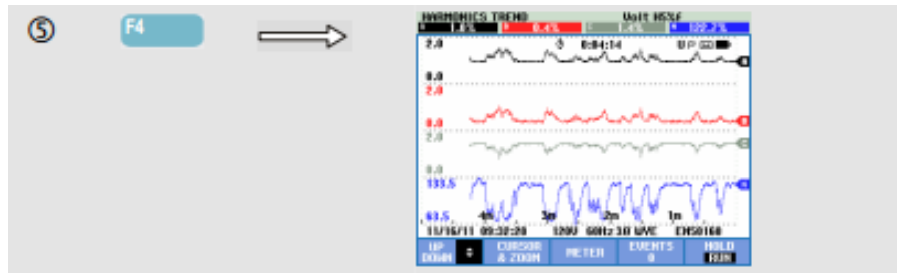
Fuente: (Fluke, 2013)

Tendencia

La tendencia nos muestra una imagen del cambio del nivel de armónicos a medida que transcurre el tiempo de medición.

Para acceder a la pantalla de tendencia de Armónicos:

Figura 19. Tendencia de armónicos



Fuente: (Fluke, 2013)

La tendencia muestra cómo varían los armónicos y los parámetros relacionados en un intervalo de tiempo: el cursor y el zoom se pueden utilizar en el modo HOLD para investigar detalles de tendencias. Todos los valores de la pantalla de multímetro quedan registrados, pero las tendencias de cada fila aparecen de una en una. Utilice las teclas de flecha para desplazarse por la pantalla de tendencia.

Teclas de función disponibles:

Tabla 12. Teclas de función disponibles para tendencia

| | |
|----|--|
| F1 | Las teclas de flecha arriba/abajo se signan para desplazarse por la pantalla de tendencia. |
| F2 | Acceso al menú de cursor y zoom. |
| F3 | Vuelta a la pantalla de multímetro. |
| F4 | Acceso a las tablas de eventos. |
| F5 | Cambio entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida. |

Fuente: (Fluke, 2013)

Consejos y sugerencias

El número de armónicos indica la frecuencia de los armónicos: el primer armónico es la frecuencia fundamental (60 o 50 Hz), el segundo armónico es el componente con dos veces la frecuencia fundamental (120 o 100 Hz), etc. La secuencia de armónicos puede ser positiva (+), cero (0) o negativa (-). En la tabla siguiente se proporciona una visión general.

Tabla 13. Tabla de frecuencias de los armónicos

| Orden | 1 ^o | 2 ^o | 3 ^o | 4 ^o | 5 ^o | 6 ^o |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Frecuencia | 60Hz 50Hz | 120Hz 100Hz | 180Hz 150Hz | 240Hz 200Hz | 300Hz 250Hz | 360Hz 300Hz |
| Secuencia | + | - | 0 | + | - | 0 |

| Orden | 7 ^o | 8 ^o | 9 ^o | 10 ^o | 11 ^o | ---- |
|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|
| Frecuencia | 420Hz 350Hz | 480Hz 400Hz | 540Hz 450Hz | 600Hz 500Hz | 660Hz 550Hz | --- |
| Secuencia | + | - | 0 | + | - | --- |

Fuente: (Autores)

Los armónicos de secuencia positiva intentan que un motor funcione más deprisa que el fundamental, mientras que los armónicos de secuencia negativa intentan que el motor funcione más lentamente que el fundamental. En ambos casos, el motor pierde par y se calienta. Los armónicos también pueden provocar que los transformadores se sobrecalienten. Los armónicos pares desaparecerán si las formas de onda son simétricas; es decir, igualmente positivas y negativas.

Los armónicos de corriente de secuencia cero se añaden en conductores de neutro. Esto puede hacer que estos conductores se sobrecalienten. Distorsión. Se debe esperar que se produzca distorsión de la corriente en un sistema con cargas no lineales como suministros eléctricos de CC. Cuando la distorsión de la corriente comienza a causar distorsión de la tensión (THD) superior al 5%, ello indicará la existencia de un posible problema. Factor K: se trata de una indicación de la cantidad de corrientes de armónicos y puede ser de ayuda a la hora de seleccionar transformadores. Utilice el factor K junto con kVA para seleccionar un transformador de repuesto para tratar cargas no lineales ricas en armónicos. (Fluke, 2013)

CAPÍTULO III

3. ADQUISICIÓN DE DATOS EN DIFERENTES CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR.

3.1 Etapas de la toma de datos.

Una correcta forma o método para la toma de mediciones es muy importante al momento de realizar el análisis de la corriente eléctrica, pues de estas mediciones dependen los resultados que se obtengan y posteriormente se analicen con el fin de detectar si algún modo de falla está presente en los motores.

Estas mediciones se las realizarán en las conexiones de un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla del laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, a este motor se le modificará de tal manera que se puedan introducir las fallas y así analizar el espectro de la corriente para identificar las señales presentes a causas de los fallos.

Se utilizó este tipo de motor para el estudio puesto que por su simplicidad de funcionamiento y su robustez es el tipo de motor eléctrico más empleado en la industria.

Alrededor del 80% utilizan motores de este tipo se emplean en casi todas las maquinas herramientas: tornos, fresadoras, limadoras, etc.; en aparatos de elevación y transpone: grúas, montacargas, etc.

Características del motor:

El motor trifásico tipo “Jaula de ardilla” que se utilizará para realizar este proyecto, tiene una potencia de 0,5 HP es de marca WEG, el cual pertenece al laboratorio de Mantenimiento Predictivo, por su tamaño y potencia es óptimo para la utilización en el laboratorio con el fin de realizar pruebas y demostraciones en ensayos de todos los métodos utilizados en la industria tanto en mantenimiento predictivo como en alineación de ejes.

Figura 20. Motor trifásico Weg



Fuente: (Weg)

Tiene la siguiente placa:

Figura 21. Placa del motor



Fuente: (Autores)

Tabla 14. Características del motor

| | |
|-----------------------|------------------|
| Marca : | WEG |
| Modelo: | TE1BF0X0! |
| Número de fases: | 3 |
| Voltaje | 220/380 |
| Corriente: | 2.10/1.22 A |
| Potencia: | 0.5 HP (0.37 kw) |
| Frecuencia: | 60 Hz |
| Velocidad: | 1680 RPM |
| Temperatura Ambiente: | 40° |

Fuente: (Autores)

Se elaboró nuevas tapas modificando las características de las tapas originales con el fin de inducir una excentricidad en el eje del rotor con respecto al del estator, estas tapas están hechas en acero, además el movimiento se lo realiza gracias unos tornillos de paso de un milímetro para poder saber cuánto se desplaza el eje con la variación del ángulo de ajuste de los tornillos.

Figura 22. Tapas de excentricidad



Fuente: (Autores)

Gracias a estas tapas se inducirá una excentricidad máxima de 0,2 mm la cual nos generará un cambio en el espectro de la corriente en las fases, así como el aumento de armónicos.

Y así poder identificar qué características tiene esta falla en el espectro de la corriente, además también en los niveles de armónicos y en el THD de la corriente, el movimiento del eje del rotor será en sentido horizontal gracias a unas guías colocadas en las tapas que no permitirán el movimiento en sentido vertical.

Para poder provocar la excentricidad, debido a la distancia mínima del entrehierro se redujo el diámetro del rotor en un milímetro.

Otra falla que se provocará en el motor va a ser una asimetría en el rotor debido a la ruptura de una de las barras o una descompensación de masa en la jaula de ardilla del rotor.

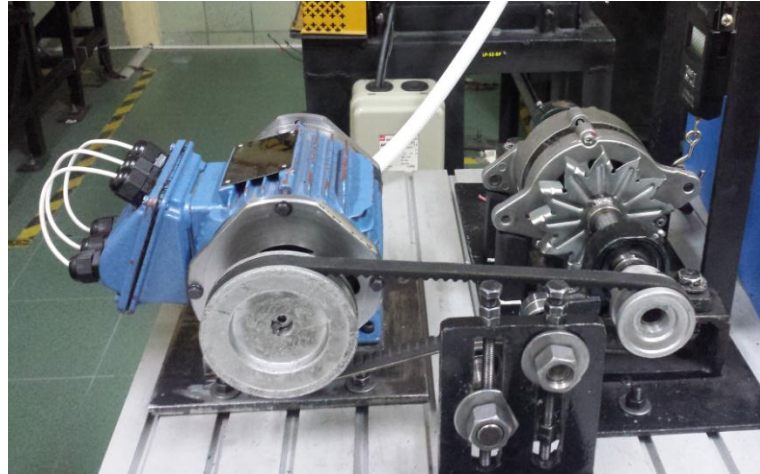
Figura 23. Rotor del motor trifásico



Fuente: (Autores)

Para que el motor trabaje en su carga máxima se acoplara por medio de transmisión por bandas y poleas a un freno magnético del laboratorio de Mantenimiento Predictivo.

Figura 24. Motor acoplado al freno magnético



Fuente: (Autores)

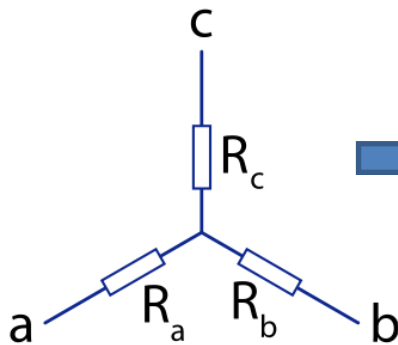
La relación de transmisión de polea es de 2:1 por lo tanto, la velocidad en el freno magnético será 2 veces la velocidad nominal del motor.

3.2 Identificación de la conexión.

Existen diversas maneras de conectar un motor asincrónico tipo “Jaula de ardilla” (MAJA) pero las más utilizadas son las llamadas de estrella o triángulo lo que diferencia a estas conexiones es el voltaje que proporciona al motor, además se puede diferenciar claramente con una observación a la caja de conexiones del motor:

Estrella “Y”

Figura 25. Conexión estrella

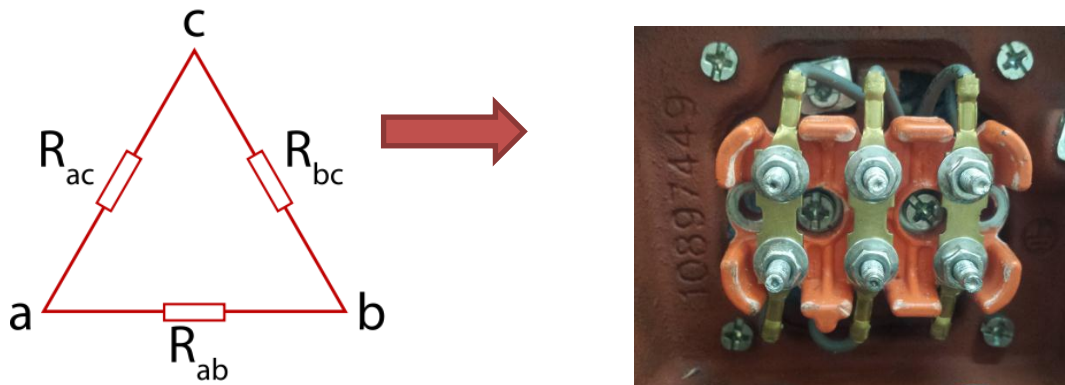


Fuente: (Autores)

Estrella: 380 V

Triángulo “ Δ ”

Figura 26. Conexión triángulo

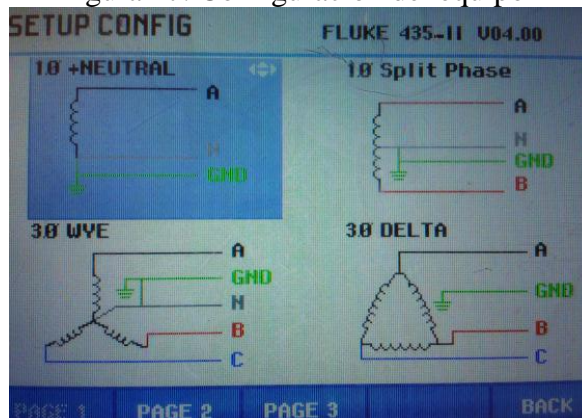


Fuente: (Autores)

Triángulo: 220 V

La forma en que se realiza la conexión determinará el voltaje en el motor, además influirá en la configuración del equipo para la toma de medidas:

Figura 27. Configuración del equipo



Fuente: (Autores)

3.3 Determinar los puntos de medición.

Para una correcta medición de la corriente eléctrica, se debe identificar dónde realizar la misma, además también se debe identificar el sentido en el cual fluye la corriente debido a que en el equipo las pinzas amperimétricas tienen una guía para la correcto utilización de éstas.

Figura 28. Pinzas amperimétricas de baja intensidad

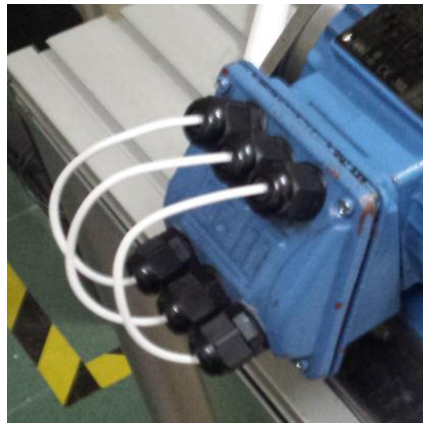


Fuente: (Autores)

Estas pinzas se las debe colocar alrededor de los conductores por los cuales se alimenta de energía al motor, o a su vez debe ser conectado en el tablero de control del motor eléctrico para evitar posibles accidentes, precautelando la integridad física del operador (ver figura 29).

Las pinzas deben ser colocadas de tal manera que el conductor quede en el centro de la pinza, además las pinzas no deben cruzarse o interferirse entre sí, puesto que se generará distorsión en la mediación tanto del espectro de la corriente como en el caso de la presencia de armónicos.

Figura 29. Puntos de medición de la corriente



Fuente: (Autores)

3.4 Equipos necesarios para la medición

Para realizar las mediciones de la corriente eléctrica en el motor se necesita de equipos adecuados que registren, y nos muestren toda lo necesitado para la realización de este trabajo, estos equipos son el analizador de calidad de la energía y un osciloscopio.

Equipo de medición de la calidad y eficiencia energética.

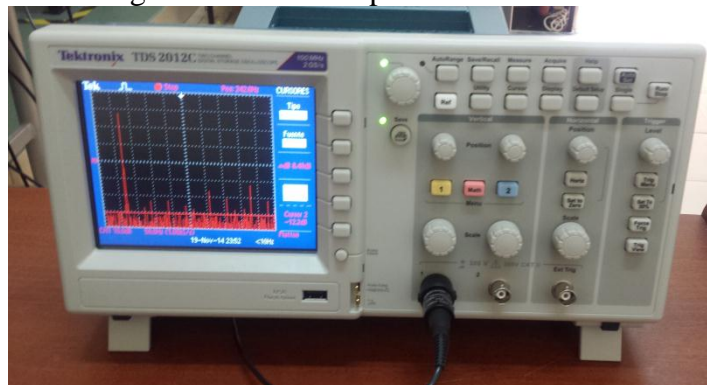
Este equipo (ver figura 15) lo emplearemos para tomar mediciones de los armónicos presentes en la corriente eléctrica de las tres fases, así como también para que nos muestre la forma de onda de la corriente.

Estas mediciones se las realiza por un tiempo corto pues éstas deben ser manera puntual ya que solo se analizará el nivel de los armónicos presentes y no necesitaremos analizar los fenómenos eléctricos tan profundamente.

Osciloscopio de dos canales

El osciloscopio se conectará a una de las fases de alimentación del motor pues los fenómenos de la corriente se presentan por igual en las tres fases, en este equipo se observará y registrará el espectro de la corriente con sus picos y características.

Figura 30. Osciloscopio de dos canales



Fuente: (Autores)

La punta terminal se debe conectar en los conectores de alimentacion del motor.

3.5 Aplicación de las normas.

Las normas de calidad de la energía y de la cantidad de armónicos en equipos eléctricos se detallan a continuación:

UNE-EN 61000-3-2:2006

Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase) (IEC 61000-3-2:2005).

También es conocida como IEC 61000-3-2:2005, esta norma es la utilizada por el osciloscopio con el fin de poner límites a los armónicos de corriente producidos o a su vez presentes en la alimentación de un motor de inducción trifásico.

Estándar internacional IEC 61000 - 3-2: 2006 tiene clasificación de equipos que abarca:

Clase A

Equipo trifásico

Electrodomésticos, excepto equipos de clase D

Herramientas fijas.

Equipos de regulación de luz destinados a ser combinado con lámparas incandescentes

Equipo de audio

Otro equipo que no está clasificado como clase B, clase C o clase D

Clase B

Herramientas portátiles

No profesional de soldadura por arco equipos

Clase C

Aparatos de iluminación

Clase D

Siguiendo los equipos tipo con potencia inferior a 600 W (incluido):

Las computadoras personales y similares

Receptores de televisión

A continuación se detalla los límites de armónicos:

Tabla 15. Límites de armónicos

| Armónicos [n] | Clase A [A] | Clase B [A] | Clase C [% de toma] | Clase D [mA/W] |
|---------------------|--------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Armónicos Impares | | | | |
| 3 | 2.3 | 3.45 | $30 \times \lambda$ | 3.4 |
| 5 | 1.14 | 1.71 | 10 | 1.9 |
| 7 | 0.77 | 1.155 | 7 | 1.0 |
| 9 | 0.40 | 0.60 | 5 | 0.5 |
| 11 | 0.33 | 0.495 | 3 | 0.35 |
| 13 | 0.21 | 0.315 | 3 | 3.85/13 |
| $15 \leq n \leq 39$ | $0.15 \times 15/n$ | $0.225 \times 15/n$ | 3 | $3.85/n$ |
| Armónicos Pares | | | | |
| 2 | 1.08 | 1.62 | 2 | - |
| 4 | 0.43 | 0.645 | - | - |
| 6 | 0.30 | 0.45 | - | - |
| $8 \leq n \leq 40$ | $0.23 \times 8/n$ | $0.345 \times 8/n$ | - | - |

Fuente: (IEC 61000 - 3-2: 2006)

Norma EN 50160

La norma proporciona límites de los principales parámetros de tensión y márgenes de desviación permisibles en el punto de acoplamiento con el usuario en sistemas públicos de distribución de electricidad en baja tensión y media tensión, en condiciones de funcionamiento normales.

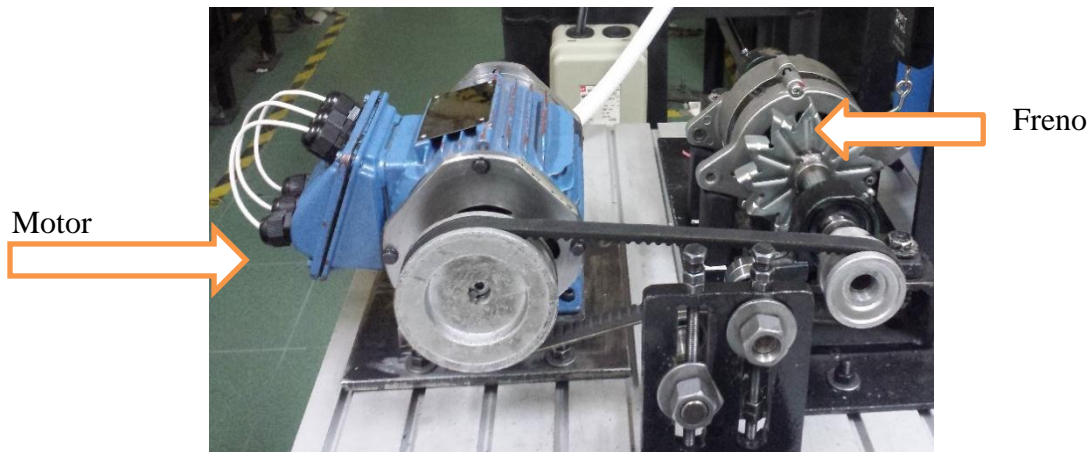
3.6 Toma de mediciones.

En la toma de mediciones vamos a ver una visión más cercana del espectro de la corriente, cantidad de armónicos y calidad energética, para ello se utilizó el analizador de la calidad de la energía que nos indicará la onda de amplitud vs tiempo, y un osciloscopio que nos indicará la amplitud vs frecuencia (espectro).

A continuación se describen los pasos iniciales para la medición:

Se instaló el motor en la mesa de trabajo conjuntamente con el freno magnético, el templador de la banda. Se alimentó de energía al motor para verificar su correcto funcionamiento. Caso contrario no ejecutará su función es decir no generará voltaje y por lo tanto no opondrá fuerza al MAJA.

Figura 31. Motor acoplado al freno magnético



Fuente: (Autores)

Se conectó el analizador de la calidad de la energía con las pinzas amperimétricas y de voltaje los conductores de alimentación del motor.

La punta terminal del osciloscopio se la conecto a uno de los conductores de alimentación del motor. Las pinzas amperimétricas deben ser colocadas con exactitud y en el sentido correcto caso contrario el equipo nos dará una medición negativa.

Figura 32. Toma de mediciones con los equipos



Fuente: (Autores)

Se prepararon los equipos para empezar con las diferentes medidas en el caso del osciloscopio detecta automáticamente si una señal es sinusoidal para poder realizar la transformación de la onda a espectro y en el caso del equipo de calidad de la energía se debe programar que tipo de fenómeno eléctrico se va a medir, esto implica que las medidas realizadas sean reales con precisión y exactitud.

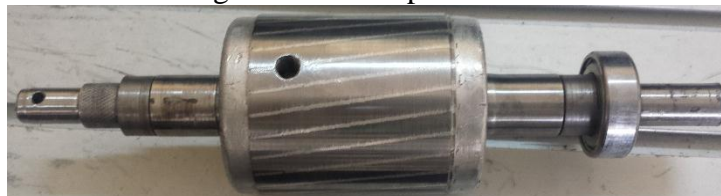
Figura 33. Calibración de los equipos



Fuente: (Autores)

Se realizó una medición provocando una asimetría en el rotor como se indica en la imagen. La asimetría consiste en una perforación en el rotor el cual después será eliminado con un prisionero para que no afecte en las siguientes mediciones.

Figura 34. Rotor perforado



Fuente: (Autores)

Como se indicó anteriormente las tapas se modificaron para provocar excentricidad del eje del rotor con respecto del eje del estator, de igual manera que en el modo de fallo anterior se tomó medidas de la calidad de energía y la forma del espectro de la corriente que circula por los conductores de alimentación del motor.

3.7 Registro.

Después de realizar las mediciones con las diferentes modificaciones en el motor así como, sin modificación para posteriormente comparar los resultados obtenidos con y sin fallos. Se debe de registrar o guardar los resultados.

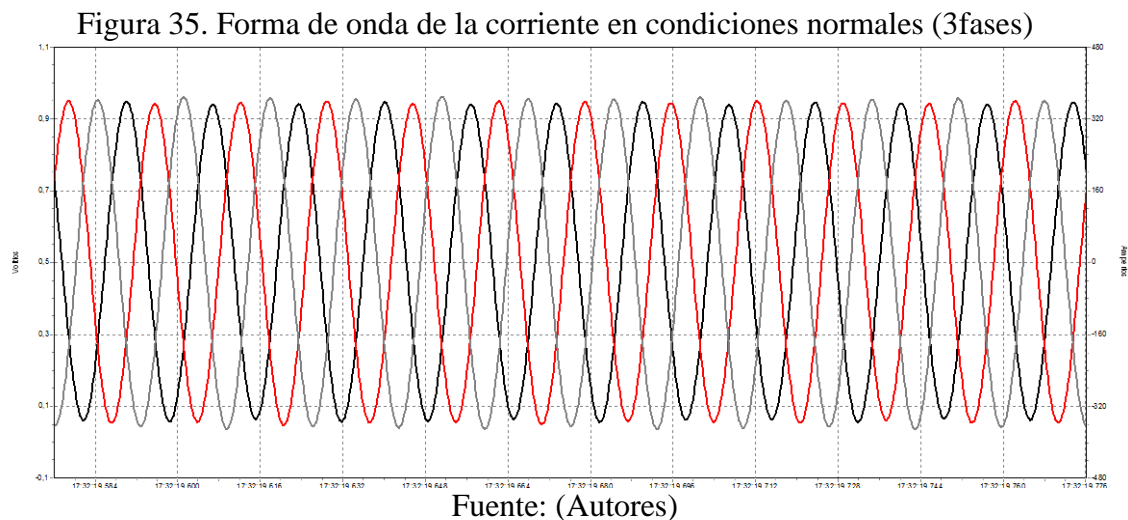
En el caso del analizador de energía los datos se guardan directamente en la tarjeta de memoria insertada en el equipo.

Y posteriormente para su análisis se debe descargar al software del equipo en el cual se podrá observar todos los fenómenos eléctricos.

En el caso del osciloscopio los datos se deben almacenar en un disco extraíble, con el fin de realizar el análisis en un ordenador posterior, así mismo se debe tomar datos de amplitud y frecuencia.

A continuación presentamos los resultados obtenidos:

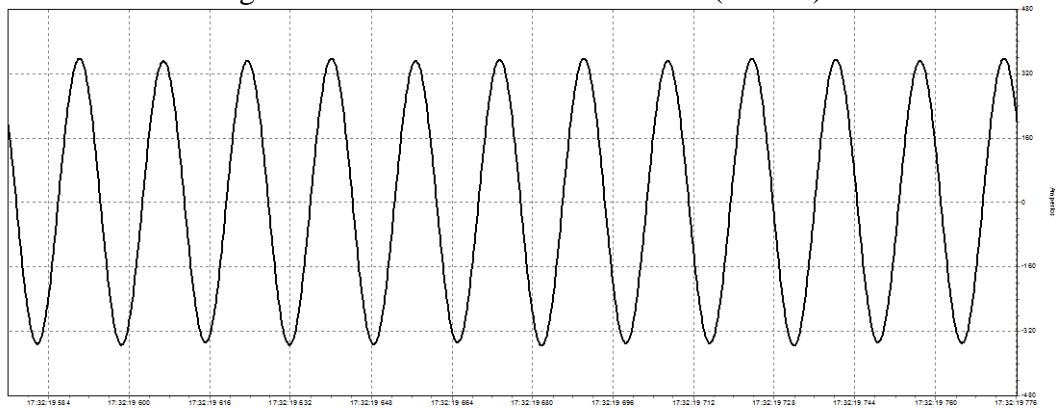
3.7.1 Motor en condiciones normales. La forma de onda de la corriente en las tres fases se puede ver en el modo osciloscopio del equipo de medición de la calidad de la energía, la forma de onda nos presenta un aspecto normal como se puede apreciar en la figura. Tanto en la gráfica de las tres fases como en las figura de las fases individuales.



La forma de onda de las fases se puede apreciar de forma individual para un mejor análisis, obtenidas gracias al software del equipo en el cual se puede identificar claramente la onda perteneciente a cada fase activando o desactivando el parámetro de medida que se desee apreciar.

A continuación se presentan las formas de onda de la corriente eléctrica de cada una de las fases:

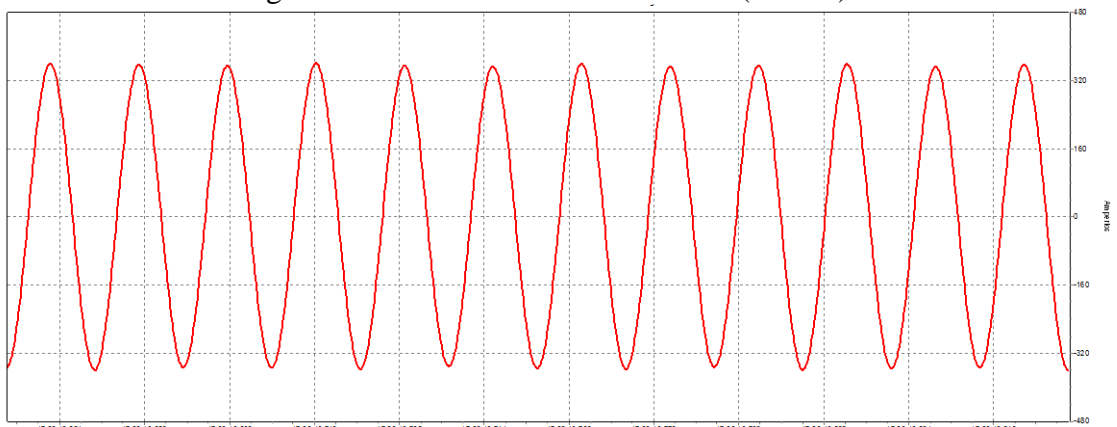
Figura 36. Forma de onda de corriente (Fase A)



Fuente: (Autores)

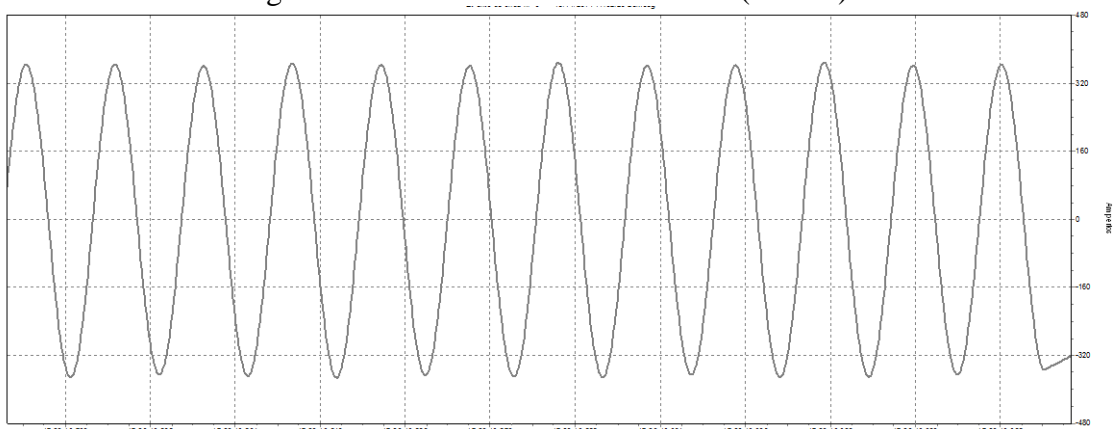
El equipo de eficiencia y calidad de la energía nos muestra las formas de onda de la corriente identificadas por medios de colores mostrándonos las diferentes medidas de la corriente.

Figura 37. Forma de onda de corriente (Fase B)



Fuente: (Autores)

Figura 38. Forma de onda de corriente (Fase C)



Fuente: (Autores)

Cantidad de armónicos de corriente

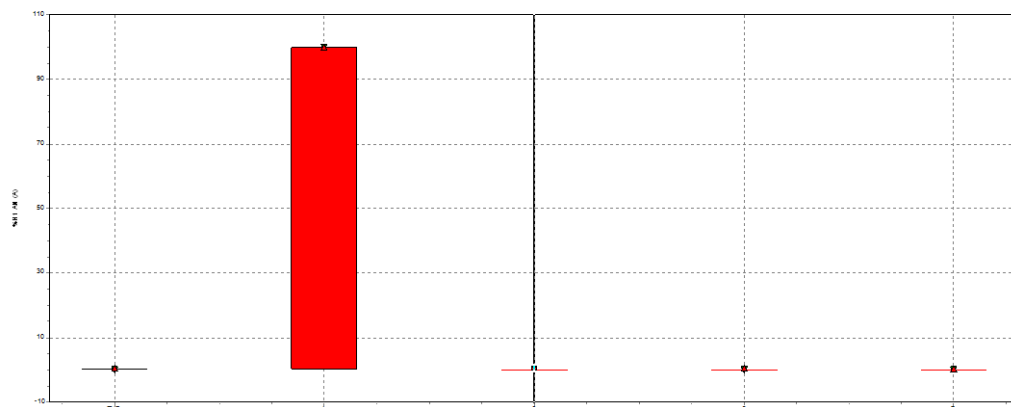
En las figuras 39, 40 y 41 se puede apreciar el nivel de los armónicos de corriente así como el THD, estas medidas fueron realizadas con el motor operando en condiciones normales y con máxima carga gracias al acople a un freno magnético.

Y como se aprecia es mínimo la cantidad de estos armónicos por ende el THD de igual manera es mínimo, lo cual nos permite corroborar que el motor se encuentra en condiciones normales de funcionamiento, sin la presencia de armónicos impares causados por la presencia de fallas.

Los armónicos impares son los presentes en la corriente de alimentación del motor generados posiblemente por equipos electrónicos con señales no sinusoidales en la red por ejemplo cargadores de computadoras, etc.

Estos armónicos presentes en la señal eléctrica se los conoce como armónicos temporales, estos pueden aparecer como consecuencia también de cambios bruscos de temperatura del motor, la presencia de estos armónicos es negativa pues se suman a los armónicos de fallos del motor ocasionando mayores consecuencias en los parámetros de funcionamiento del motor.

Figura 39. Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase A)



Fuente: (Autores)

Tabla 16. Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase A)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 0,48 | 100 | 1,01 | 0,48 | 0,33 |
| Media | 0,337 | 100 | 0,142 | 0,072 | 0,075 |
| Mínimo | 0,19 | 100 | 0,08 | 0,03 | 0,05 |

Fuente: (Autores)

Figura 40. Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase B)

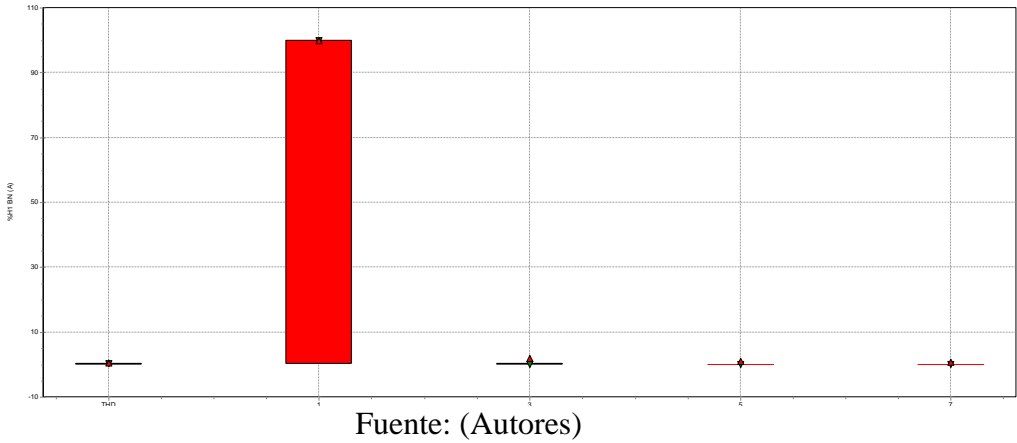


Tabla 17. Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase B)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|--------|------|
| Máxima | 0,65 | 100 | 1,85 | 1,04 | 0,73 |
| Media | 0,415 | 100 | 0,215 | 0,0117 | 0,05 |
| Mínimo | 0,22 | 100 | 0,13 | 0,08 | 0,01 |

Fuente: (Autores)

Como se puede observar en las figuras los niveles de los armónicos impares son bajos en las tres fases, así como el THD que no llega al 1% de la fundamental esto se debe a las condiciones normales de funcionamiento del motor.

Figura 41. Cantidad de armónicos de corriente en condiciones normales (fase C)

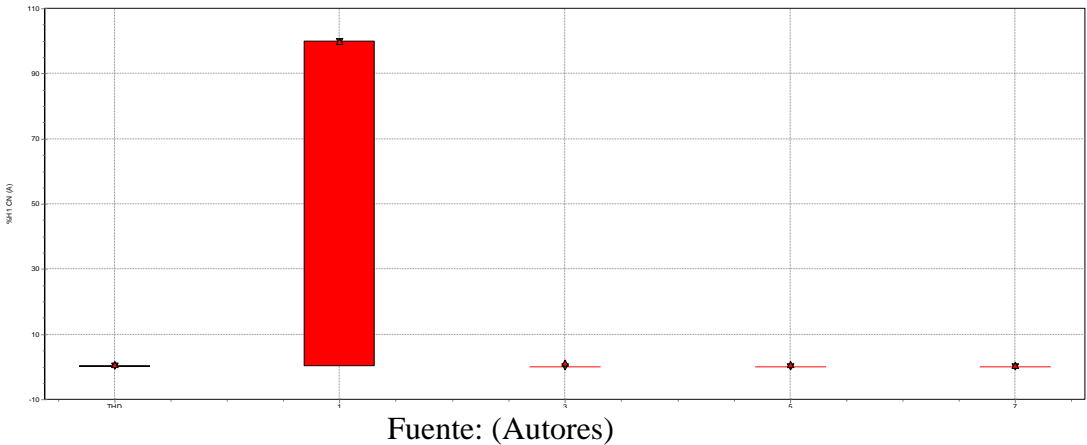


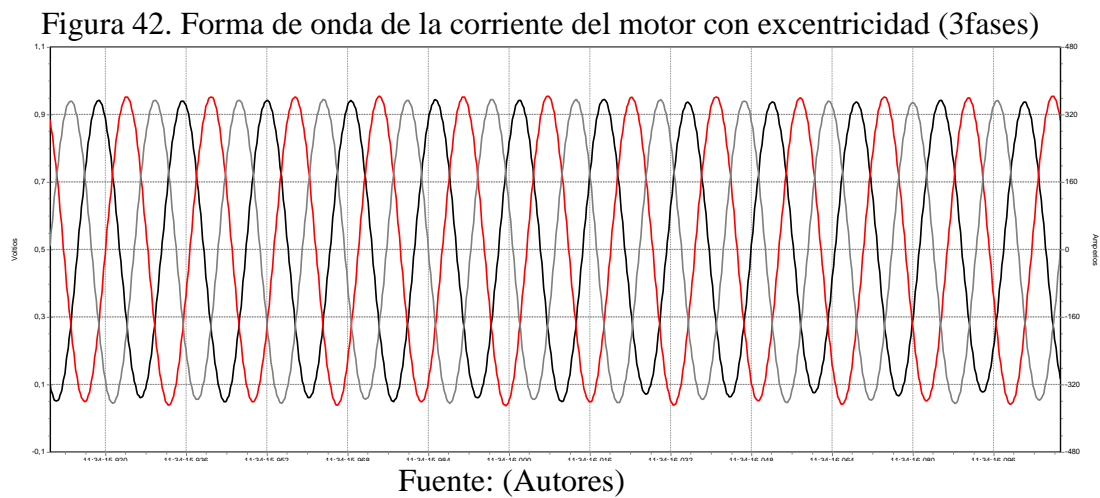
Tabla 18. Medidas del nivel de armónicos motor en condiciones normales (fase C)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|------|
| Máxima | 0,72 | 100 | 1,29 | 0,69 | 0,48 |
| Media | 0,425 | 100 | 0,185 | 0,125 | 0,08 |
| Mínimo | 0,2 | 100 | 0,08 | 0,07 | 0,04 |

Fuente: (Autores)

3.7.2 Motor con falla (excentricidad). Cuando se introdujo el primer modo de fallo en este caso la excentricidad del entrehierro, de igual forma se tomó medidas para posteriormente analizar los resultados y así poder apreciar lo que distingue a cada uno de los fallos de un motor en condiciones normales.

La forma de onda de las mediciones del motor con excentricidad la tomamos con el equipo de la calidad de la energía al mismo tiempo que se toma las medidas con el osciloscopio y se muestra a continuación.



De igual manera que en el caso cuando el motor trabaja en condiciones normales se presenta las tres fases de manera individual, en la forma de onda no se hace evidente un cambio o se identifica fenómenos eléctricos evidentes como un aumento o descenso de corriente.

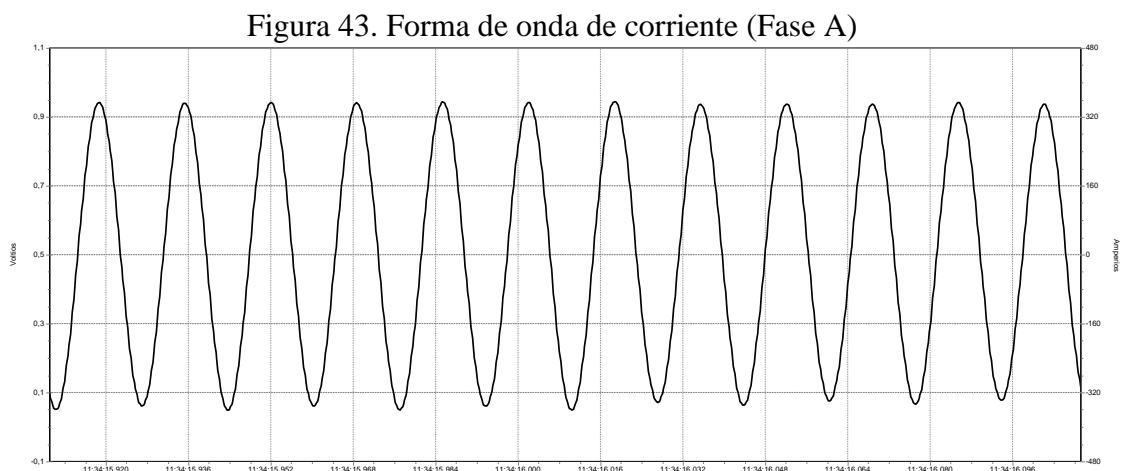
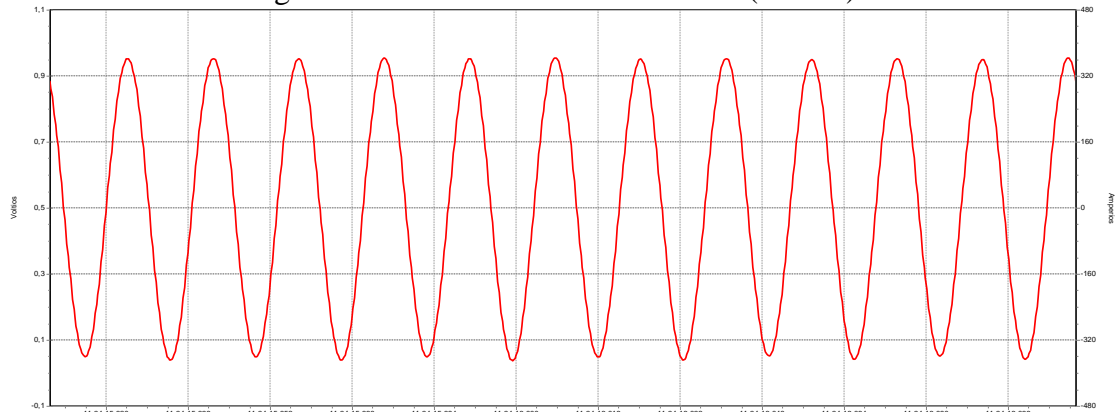
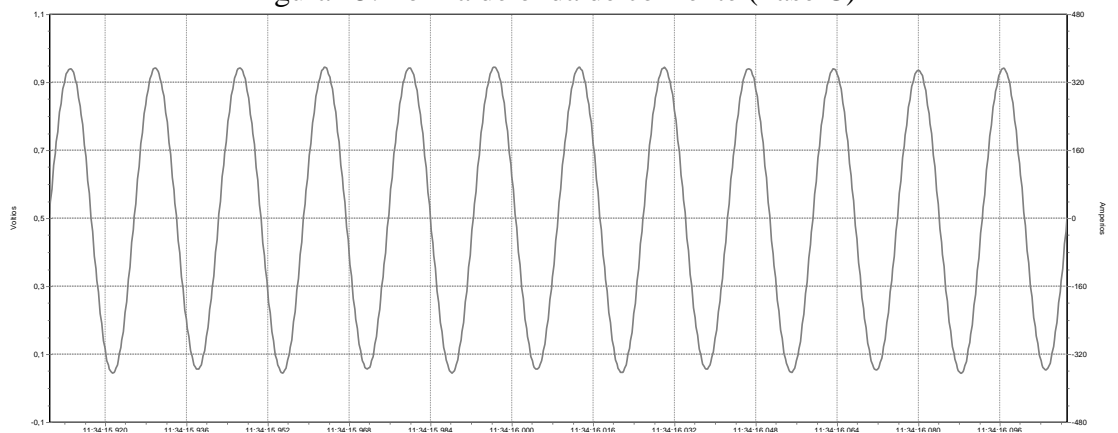


Figura 44. Forma de onda de corriente (Fase B)



Fuente: (Autores)

Figura 45. Forma de onda de corriente (Fase C)

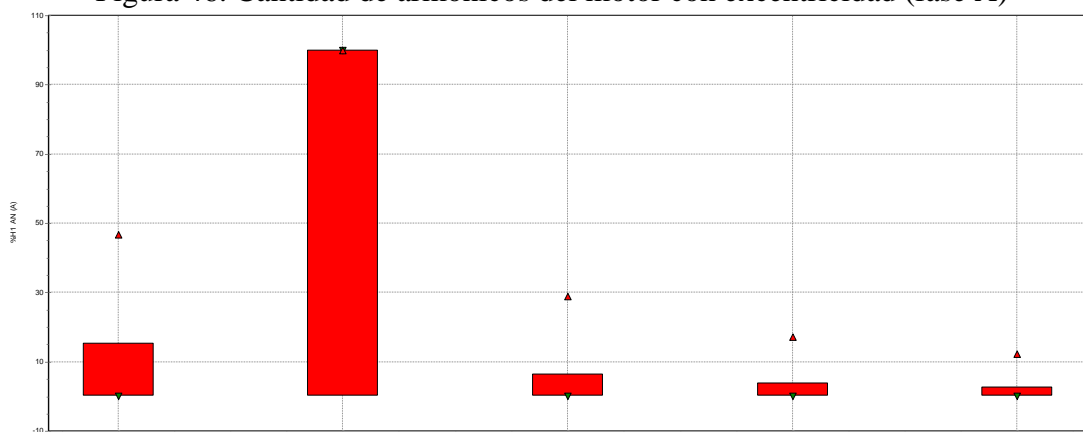


Fuente: (Autores)

Cantidad de armónicos de corriente

En la figura 46 se puede apreciar a través de barras los niveles de los armónicos y del THD de las mediciones cuando un motor está con una excentricidad, y a continuación de la figura la tabla nos indican los valores: máximo, medio y mínimo de las barras.

Figura 46. Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase A)



Fuente: (Autores)

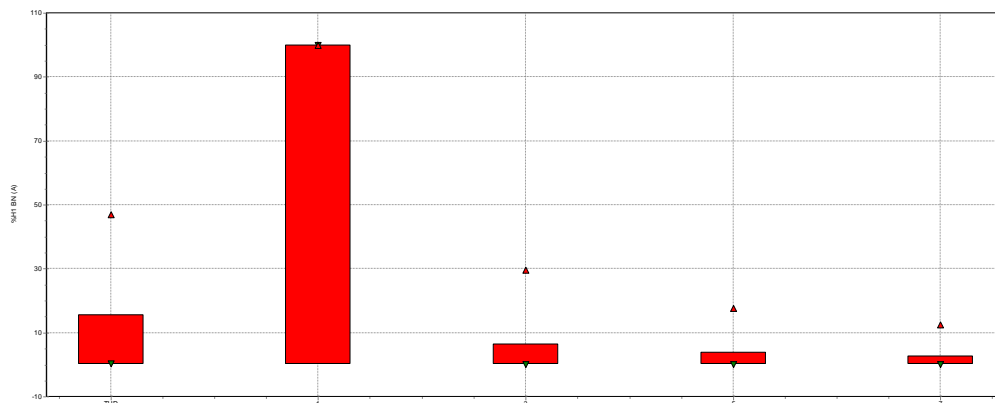
Tabla 19. Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase A)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|--------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 46,73 | 100 | 28,93 | 17,12 | 12,23 |
| Media | 15,263 | 100 | 6,357 | 3,732 | 2,633 |
| Mínima | 0,19 | 100 | 0,08 | 0,04 | 0,03 |

Fuente: (Autores)

Las pinzas amperimetricas están colocadas en las tres fases por tal razón se puede medir el nivel de los armonicos individualment como se puede apreciar en las figuras, las tres fases presentan sus respectivas tablas de valores, evidenciando el aumento de los armonicos.

Figura 47. Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase B)



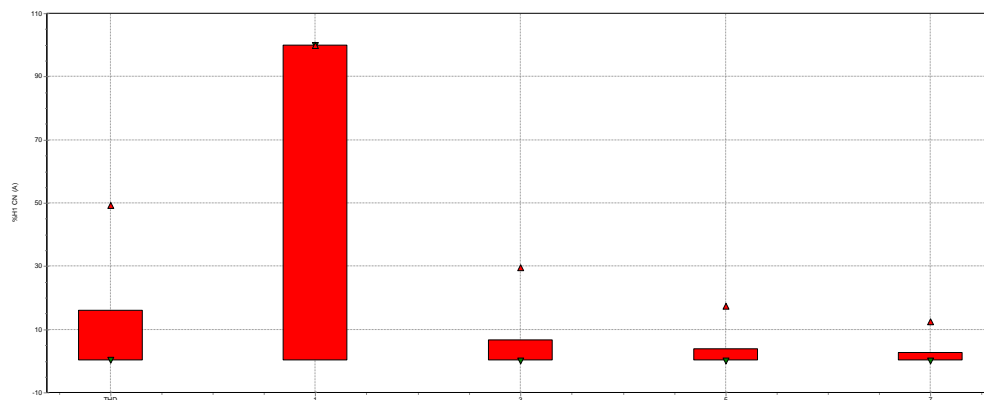
Fuente: (Autores)

Tabla 20. Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase B)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 46,98 | 100 | 29,71 | 17,54 | 17,54 |
| Media | 15,59 | 100 | 6,435 | 3,805 | 3,805 |
| Mínima | 0,23 | 100 | 0,09 | 0,07 | 0,07 |

Fuente: (Autores)

Figura 48. Cantidad de armónicos del motor con excentricidad (fase C)



Fuente: (Autores)

Tabla 21. Medidas del nivel de armónicos motor con excentricidad (fase C)

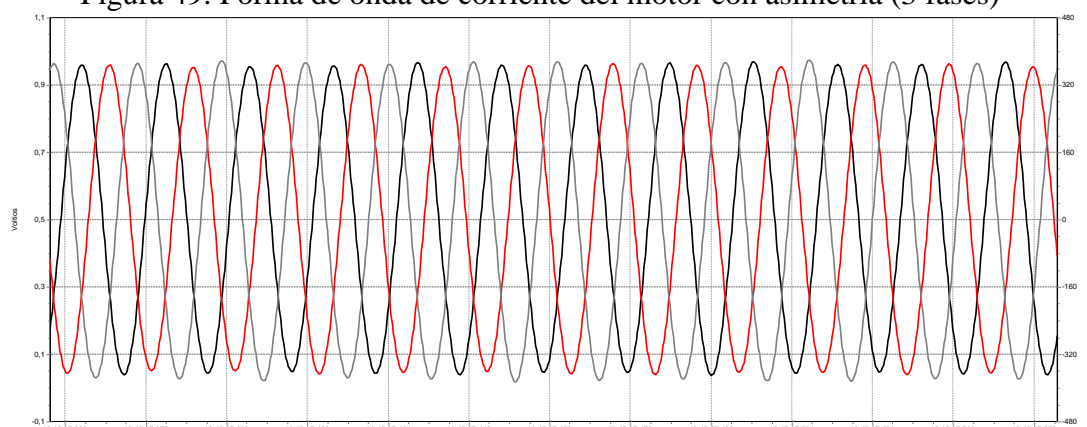
| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 49,35 | 100 | 29,53 | 17,42 | 12,46 |
| Media | 15,9 | 100 | 6,595 | 3,887 | 2,683 |
| Mínima | 0,2 | 100 | 0,09 | 0,04 | 0,06 |

Fuente: (Autores)

3.7.3 Motor con falla (asimetría rotor). Cuando al motor se induce una asimetría en este caso en el rotor por una barra rota o rotor perforado los datos obtenidos serán como en el caso de la forma de onda de la corriente en las tres fases muy similar a los datos obtenidos anteriormente, la diferencia se notara en el espectro de la corriente así como en la figura de barras.

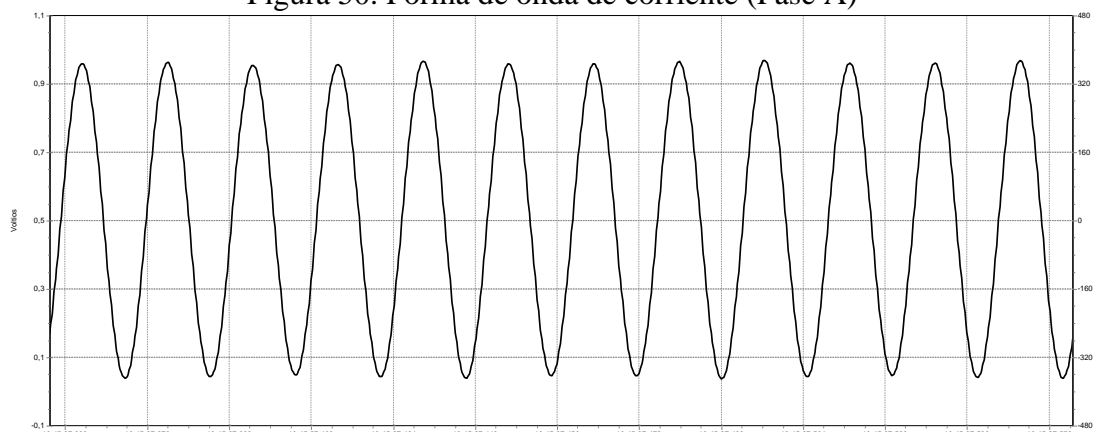
La asimetría se inducirá con una perforación en el rotor del motor para provocar cambios en el espectro de la corriente, posteriormente el agujero se eliminará por medio de un prisionero para que regrese a las condiciones normales de funcionamiento.

Figura 49. Forma de onda de corriente del motor con asimetría (3 fases)



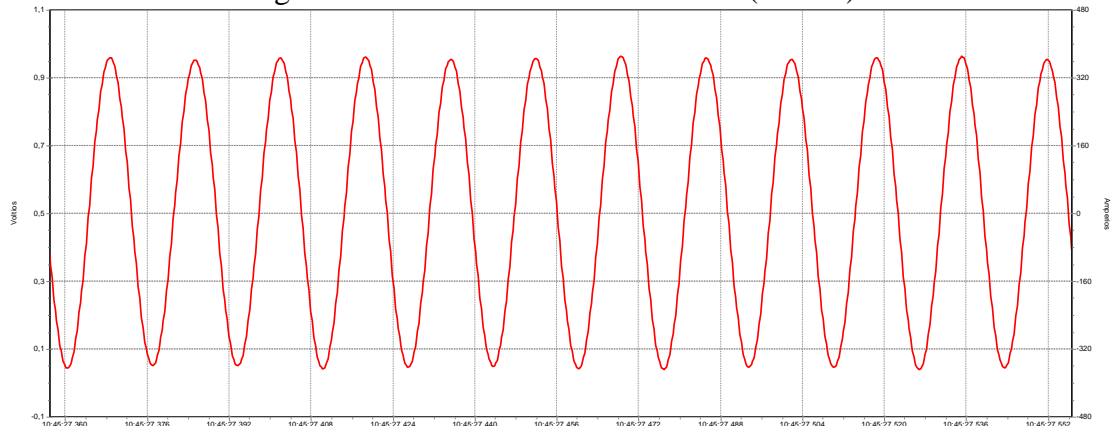
Fuente: (Autores)

Figura 50. Forma de onda de corriente (Fase A)



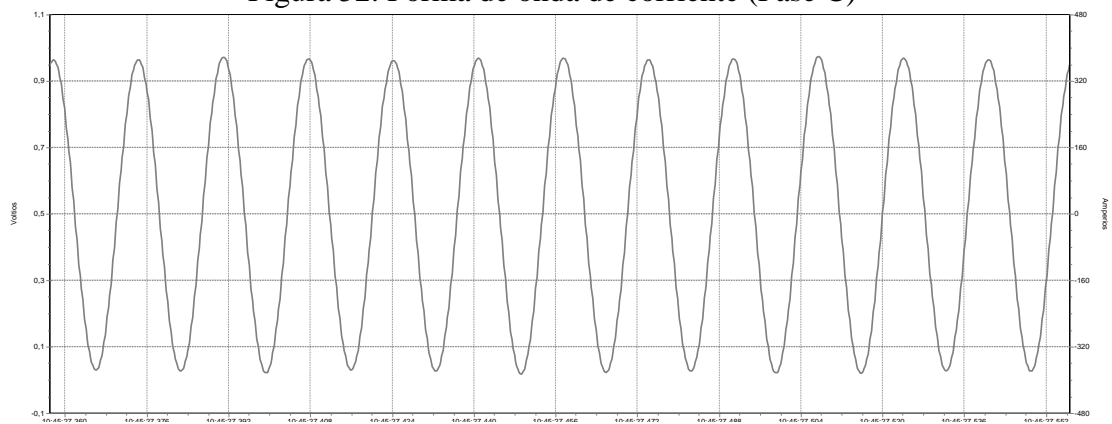
Fuente: (Autores)

Figura 51. Forma de onda de corriente (Fase B)



Fuente: (Autores)

Figura 52. Forma de onda de corriente (Fase C)

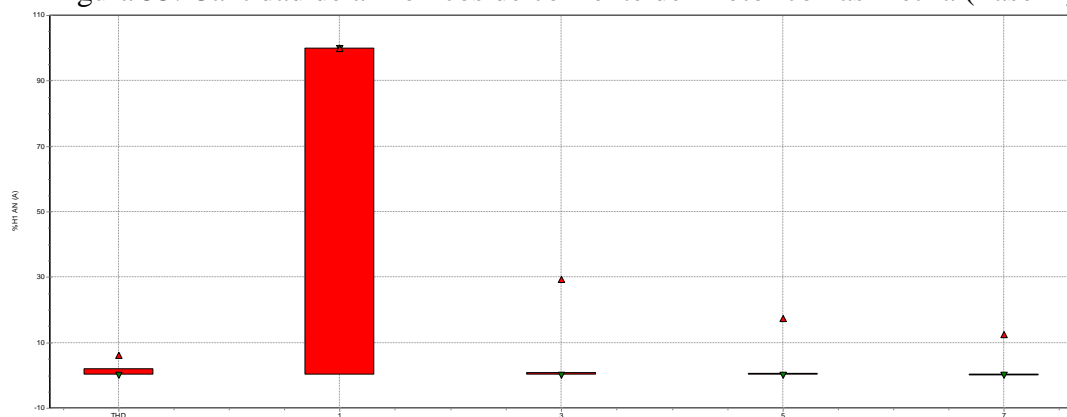


Fuente: (Autores)

Cantidad de armónicos de corriente

En las figuras 53, 54 y 55 se puede apreciar los niveles de los armónicos armónicos distintos a los registrados anteriormente, pues en este caso los armónicos son causados por una falla en el rotor del motor.

Figura 53. Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase A)



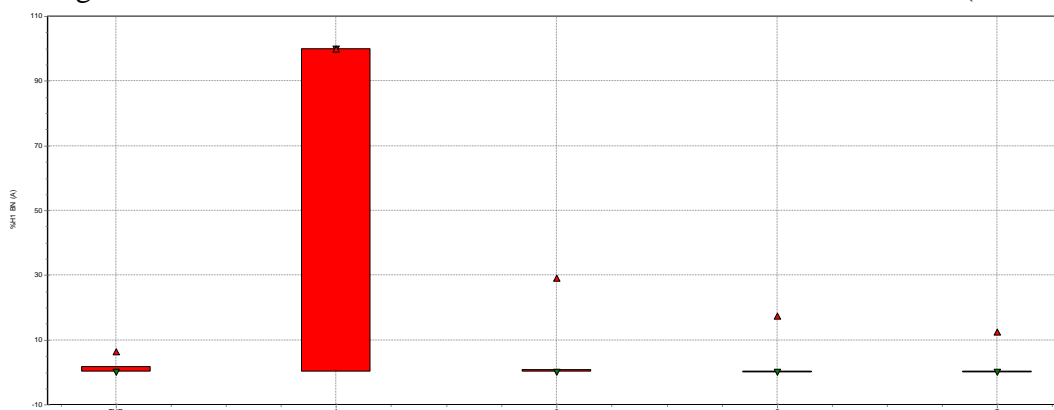
Fuente: (Autores)

Tabla 22. Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase A)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 6,17 | 100 | 29,38 | 17,4 | 12,42 |
| Media | 1,993 | 100 | 0,832 | 0,475 | 0,357 |
| Mínima | 0,19 | 100 | 0,07 | 0,04 | 0,05 |

Fuente: (Autores)

Figura 54. Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase B)



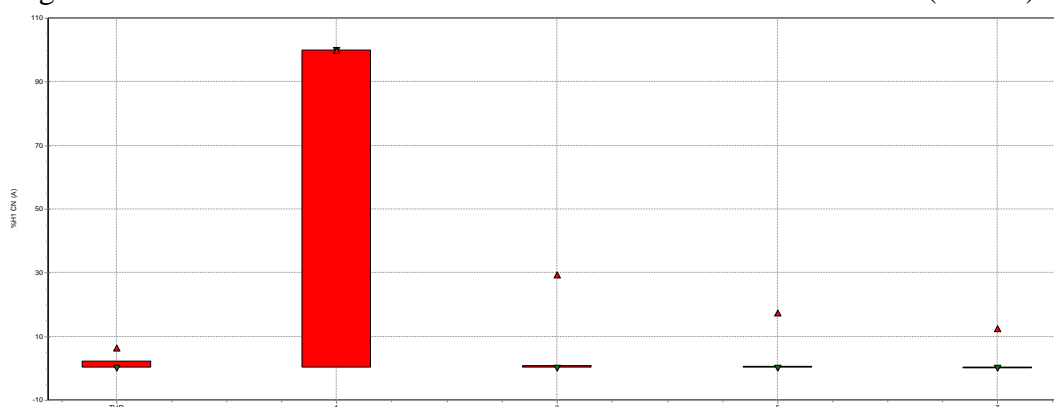
Fuente: (Autores)

Tabla 23. Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase B)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 6,3 | 100 | 29,22 | 17,34 | 12,48 |
| Media | 1,832 | 100 | 0,787 | 0,427 | 0,305 |
| Mínima | 0,19 | 100 | 0,09 | 0,04 | 0,03 |

Fuente: (Autores)

Figura 55. Cantidad de armónicos de corriente del motor con asimetría (fase C)



Fuente: (Autores)

Tabla 24. Medidas del nivel de armónicos del motor con asimetría (fase C)

| Medida | THD | 1 | 3 | 5 | 7 |
|--------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Máxima | 6,45 | 100 | 29,34 | 17,48 | 12,44 |
| Media | 2,085 | 100 | 0,873 | 0,52 | 0,37 |
| Mínima | 0,19 | 100 | 0,07 | 0,05 | 0,04 |

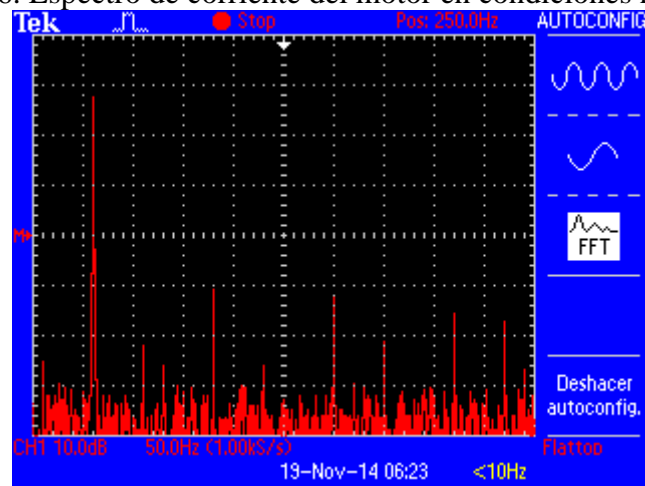
Fuente: (Autores)

3.8 Espectros de corriente

3.8.1 Medición con un motor en condiciones normales. Mediante la transformada de Fourier la forma de onda de la corriente pasa a ser un espectro en el cual se puede analizar el cambio de esta para asociar con una de las fallas presentadas de igual manera que las figuras anteriores en posteriores capítulos se las analizará para ver las características propias de éstas.

El motor en condiciones normales presento el siguiente espectro de corriente eléctrica, el cual nos muestra el gráfico de amplitud vs frecuencia que tiene picos de los armónicos de la fundamental (ver figura 56).

Figura 56. Espectro de corriente del motor en condiciones normales



Fuente: (Autores)

Tabla 25. Medidas de picos de los armónicos del motor en condiciones normales

| Armónicos | Amplitud(dB) | Frecuencia |
|-----------|--------------|------------|
| 1 | 61,6 | 60 Hz |
| 3 | 24 | 180 Hz |
| 5 | 22,8 | 300 Hz |
| 7 | 18,8 | 420 Hz |

Fuente: (Autores)

También se presentaron puntos altos en las siguientes frecuencias que no corresponden a los armónicos de la frecuencia fundamental, los cuales pueden ser característicos de los modos de fallo presentados, o solo presencia de ruido al momento de realizar las mediciones.

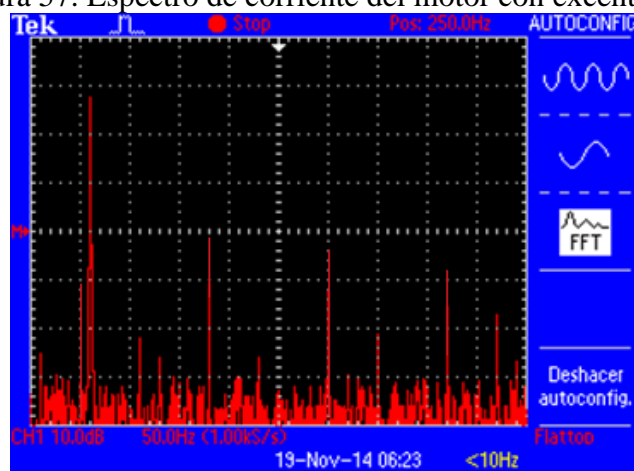
Tabla 26. Medidas de picos altos del motor en condiciones normales

| Amplitud(dB) | Frecuencia |
|--------------|------------|
| 8,40 | 130Hz |
| 8,80 | 230Hz |
| 14 | 352Hz |
| 18 | 470Hz |

Fuente: (Autores)

3.8.2 Motor con falla (excentricidad). El motor con excentricidad presentó unos picos característicos de los armónicos impares de la frecuencia fundamental que son los más distintivos en la figura.

Figura 57. Espectro de corriente del motor con excentricidad



Fuente: (Autores)

Tabla 27. Medidas de picos de los armónicos del motor con excentricidad

| Armónico | Amplitud(dB) | Frecuencia |
|----------|--------------|------------|
| 1 | 63,81 | 60 Hz |
| 3 | 23,01 | 180 Hz |
| 5 | 23,81 | 300 Hz |
| 7 | 24,21 | 420 Hz |

Fuente: (Autores)

Se puede apreciar puntos altos en frecuencias distintas como en la figura 47 pero con un nivel más bajo, a continuación la amplitud y la frecuencia de estos picos:

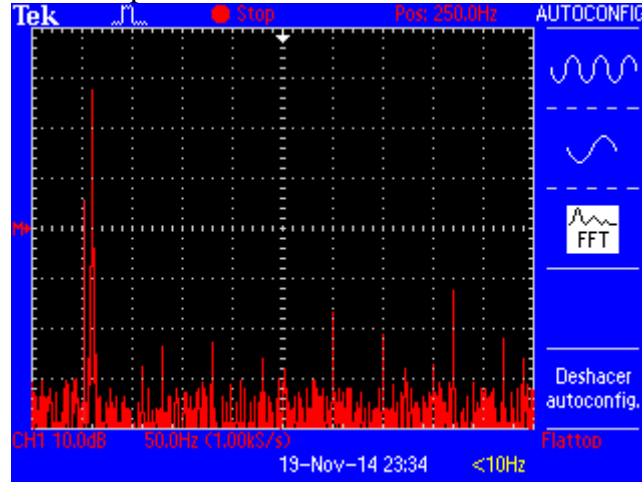
Tabla 28. Medidas de picos altos del motor con excentricidad

| Amplitud(dB) | Frecuencia |
|--------------|------------|
| 10 | 130Hz |
| 7,20 | 230Hz |
| 9,6 | 352Hz |
| 16,4 | 470Hz |

Fuente: (Autores)

3.8.3 Motor con falla (asimetría rotor). Cuando se tomó las medidas del motor cuyo rotor esta con una ruptura, él espectro de la corriente toma un cambio un poco más distintivo que los anteriores medias (ver la tabla 29).

Figura 58. Espectro de corriente del motor con asimetría



Fuente: (Autores)

Además del cambio en la figura 58 comparada con las anteriores figuras 56 y 57, también se aprecia en los picos que no tiene frecuencia múltiplo de la fundamental un pequeño incremento.

Tabla 29. Medidas de picos de los armónicos del motor con asimetría

| Armónicos | Amplitud(dB) | Frecuencia |
|-----------|--------------|------------|
| 1 | 67.2 | 60 Hz |
| 2 | 3.6 | 120 Hz |
| 3 | 16.4 | 180 Hz |
| 5 | 22.8 | 300 Hz |
| 6 | 8.4 | 360 Hz |
| 7 | 26.8 | 420 Hz |

Fuente: (Autores)

Tabla 30. Medidas de picos altos del motor con asimetría

| Amplitud(dB) | Frecuencia |
|--------------|------------|
| 15,6 | 130Hz |
| 13,2 | 230Hz |
| 17,6 | 352Hz |
| 16,4 | 470Hz |

Fuente: (Autores)

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE MODOS DE FALLO DEL MOTOR.

4.1 Interpretación de datos.

Los datos obtenidos de la cantidad y amplitud de armónicos así como el espectro de la corriente eléctrica se deben interpretar de tal manera que se pueda conocer y apreciar los cambios entre un motor en condiciones normales de funcionamiento y con un motor con algún modo de falla.

Los datos obtenidos del motor cuando el motor se encuentra en condiciones normales de funcionamiento nos presentan el mismo nivel y amplitud de armónicos en las tres fases (ver figura 39, 40 y 41).

Los armónicos de corriente que se detectaron son impares hasta el orden 7 es decir hasta de frecuencia de 420 Hz, además del THD el cual se muestra al principio de la tabla 18 y a continuación los armónicos desde el fundamental hasta el de orden 7.

Así mismo en el espectro de la corriente tomado con el osciloscopio nos mostró la misma cantidad y orden de los armónicos. La figura 56 es el espectro de la corriente el cual es la transformada de Fourier de la onda amplitud vs tiempo.

El espectro es amplitud vs frecuencia en este se puede apreciar el cambio en la amplitud de los picos en espectros del motor con fallas comparados con el espectro del motor en condiciones normales.

El aumento o disminución de estos armónicos e interarmónicos son las características que se utilizara para identificar los modos de fallo presentes en los MAJA.

4.2 Comparación entre datos obtenidos y parámetros de buen funcionamiento de los motores.

Después de la adquisición de datos así como el registro, se debe analizar las mediciones de las fallas inducidas con las mediciones del motor trabajando en condiciones normales.

Se hace evidente el cambio en el nivel de los armónicos cuando se observa la gráfica de barras (ver figura 39 y figura 46)

El THD aumenta significativamente y se aprecia un aumento en armónicos de orden impar hasta el de orden 7, en la gráfica del motor con excentricidad.

Mientras que en la gráfica (ver figura 53) de la asimetría del rotor de igual manera se puede apreciar el incremento del THD, el incremento de los armónicos impares no es notorio como en el caso de excentricidad.

Las formas de onda no presentan un evidente cambio en su forma, tanto en el trabajando en condiciones normales así como cuando el motor se encuentra con las fallas inducidas (ver figuras 36, 43 y 50).

El en espectro de la corriente se puede diferenciar algunas características, por ejemplo el espectro de la corriente cuando el motor está en condiciones normales presenta algunos picos de armónicos de la corriente pues tienen frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental en este caso de 60 Hz, y de igual manera picos de otras frecuencias diferentes a los múltiplos de la fundamental (ver figura 56).

En el momento que se induce una excentricidad se puede notar el incremento de los armónicos impares que son los picos más altos en el espectro de la corriente, se puede notar además que el pico del armónico fundamental aumenta su grosor lo cual nos indica la presencia de subarmónicos debido al deslizamiento del rotor con respecto de la velocidad de sincronismo. Esto se debe principalmente debido a que la excentricidad genera corrientes con frecuencia igual o similar a la del deslizamiento.

Además se puede apreciar el cambio de nivel en la amplitud de los picos que no tienen frecuencia múltiplo de la fundamental (ver figura 57).

En el caso de la asimetría del motor el espectro nos muestra una característica diferente, como la notoria presencia del armónico de orden 7 que se diferencia del resto de los armónicos (ver figura 58).

Además los armónicos de orden 3 y 5 se redujeron con respecto a los armónicos del mismo orden en el espectro de la corriente cuando el motor se encuentra en condiciones normales.

4.3 Modos de fallo presentados

Los modos de fallo que a continuación se muestra los fallos inducidos para la realización de esta tesis.

Excentricidad en el rotor.

Asimetría en el motor.

4.4 Causas de los modos de fallos.

Los modos de falla inducidos en los motores son los más comunes en el motores eléctricos trifásicos tipo jaula de ardilla, y como estos motores son los más usados en la industria son estos modos de fallos los que pueden desencadenar una parada inesperada de la producción lo que ocasionaría pérdidas de producción y tiempo, a continuación se presenta las causas de los modos de fallo:

4.4.1 *Excentricidad.* La excentricidad se presenta por la existencia de un rotor deformado que presente una sección ovalada en la siguiente figura se muestra este tipo de excentricidad.

Un núcleo del estator con forma ovalada producto de defectos en la fabricación.

Desalineación de los rodamientos durante el montaje.

Desgaste de los rodamientos.

Acoples mecánicos desalineados.

Tolerancias dimensionales de los distintos componentes.

Posicionamiento incorrecto del rotor respecto al estator

Deformaciones del eje

Averías en los rodamientos, tales como: montaje defectuoso, holguras, desgaste excesivo, etc.

Desalineamiento

Desequilibrio dinámico del rotor

Resonancia mecánica a velocidad crítica

Desequilibrio de las fuerzas radiales en el entrehierro (campo magnético desequilibrado)

Deformación del rotor consecuencia de sobrecalentamiento o de la existencia de gradientes térmicos.

El inapropiado montaje del motor puede llevar a una desuniformidad del entrehierro. Un perno o tornillo suelto permitiría un desajuste durante la expansión térmica de la carcasa. Lo cual con el tiempo, podría provocar deterioro del chasis y posible excentricidad del estator. El término comúnmente usado para describir que un motor está mal montado es “pie-flojo”.

Durante la construcción del motor, una malformación de la característica redonda del rotor o el estator causará excentricidad en el entrehierro

La excentricidad puede desarrollarse debido a la tensión inapropiada de las correas acopladas al eje del motor.

Correas desalineadas, rodamientos desgastados, o un eje torcido provocan excentricidad. Durante la fabricación del rotor, podrían introducirse tensiones mecánicas desiguales en la jaula o en el apilamiento laminar que llevan a desviación del rotor

4.4.2 *Asimetría de un rotor (rotura de barra).* El rompimiento de una o varias barras puede ser causado por muchas razones, entre las cuales se encuentran:

Estrés térmico debido a sobrecargas y desbalances, puntos calientes o pérdidas excesivas, chispas.

Estrés magnético causado por fuerzas electromagnéticas, atracción magnética desbalanceadas, ruido y vibración electromagnética.

Estrés residual debido a problemas de manufactura.

Estrés dinámico proveniente del eje de torsión y fuerzas centrifugas.

Estrés medioambiental causado por contaminación y abrasión del material del rotor debido a químicos o humedad.

Estrés mecánico debido a laminaciones sueltas, partes debilitadas, fallas en los cojinetes, etc.

Condiciones de operación: Cargas pulsantes las cuales ocasionan cambios en el torque del eje.

4.5 Consecuencias de los modos de fallo

Las consecuencias de los modos de fallos es lo que siempre un ingeniero de mantenimiento debe y está dispuesto a evitar, desde las más sencillas a las más catastróficas a continuación se citan las consecuencias de los modos de falla en los MAJA.

Excentricidad y asimetría:

Desequilibrio del campo magnético en el entrehierro.

Circulación de corriente eléctrica a través de los rodamientos, lo que conduciría a fallos en los rodamientos y posibles paros inesperados.

Vibraciones

Ruido

La excentricidad del rotor provoca un desbalance en la carga del motor.

Sobrecalentamiento de las espiras del estator y por ende cortocircuitos en las mismas.

Aparte de estas consecuencias los armónicos provocados por estos modos de falla conllevaran a más efectos.

Efectos de los armónicos

Los efectos de la distorsión armónica se puede manifestar como un número excesivo de fusibles fundidos en bancos de condensadores, sobrecalentamiento y vibraciones mecánicas en los motores, disparo inexplicable de interruptores, operación incorrecta de contactores y relés, aumento de las intensidades en los conductores de neutro e interferencia con sistemas de comunicación, algunos de los posibles efectos causados por los armónicos en los equipos son.

Aumento de pérdidas y calentamiento en equipo eléctrico.

Registros incorrectos en equipos de control y monitoreo.

Sobrecalentamiento del equipo y conductores eléctricos.

Fallas en aislamientos de equipos eléctricos.

Dificultad en arranques de procesos.

Fallas u operación prematura de dispositivos de protección.

Fallas de sincronización de disparo en equipos tales como variadores de velocidad.

Sobre o sub facturación de energía por alteración del valor rms de la tensión y/o corriente que pasa por el medidor de energía.

Es bueno conocer que la operación continua con corrientes armónica excesivas lleva a incrementos de la tensión y sube excesivamente la temperatura, lo que resulta en la reducción de la vida útil de los motores.

4.6 Como corregir los modos de fallo

Excentricidad

Para corregir este fenómeno se procede a desarmar el motor y se coloca el eje en un torno, luego se realiza el proceso de cilindrado del rotor con el fin de rectificar ya sea el eje o el rotor en sí.

Si es extrema la excentricidad debido al desbalance en el rotor, con una soldadora se procede a colocar cordones de soldadura en el eje, para aumentar masa a los extremos del rotor y posteriormente se rectifica en un torno.

Asimetría

Se retira el rotor del motor para localizar donde está la ruptura de la barra o de un anillo de cortocircuito para posteriormente soldar la abertura después de esto rectificar para evitar picos o que puedan causar daños en el estator.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Para utilizar al máximo la capacidad el equipo de medición de la calidad se tomó una capacitación por parte de los proveedores, además la lectura del manual del equipo y del software ayudó de una manera significativa para el correcto uso del mismo en la realización de este trabajo.

Se identificó el sentido de las pinzas amperimétricas el cual debe ser colocado correctamente o sino las medidas obtenidas tendrán sentido contrario y no reflejarían unas medidas reales.

El motor de inducción trifásico es un motor de funcionamiento sencillo, de gran potencia muy apetecido en la industria por sus características de robustez y trabajo, se conoció que su funcionamiento se basa en inducir corriente a través de los bobinados del estator para que éstos a la vez induzcan corriente en el rotor a así poder generar el movimiento circular.

Los componentes de la corriente medidos y analizados en este trabajo nos indican una manera de detectar los modos de fallo por medio de métodos no muy utilizados como es el análisis de la calidad de la energía así como el análisis del espectro de la corriente.

Como se pudo analizar el espectro de la corriente así como la cantidad de armónicos presentados en la corriente puede ser un indicativo de que el motor tiene un modo de falla, así se demostró en este trabajo, pues al momento de inducir un modo de falla en este caso excentricidad y asimetría del entrehierro, el espectro de la corriente así como el nivel de armónicos tuvo cambios de nivel como de forma.

El cambio en la amplitud de los armónicos como en el THD se pudo observar en el gráfico de barras de armónicos en el equipo de calidad de la energía, además de la amplitud de los armónicos observada en el osciloscopio.

Los modos de falla detectados en este trabajo son los dos más comunes en los motores trifásicos jaula de ardilla.

La distorsión de la corriente puede aumentar la cantidad de armónicos lo que nos produciría un aumento de corrientes parásitas con distintas frecuencias y distintos sentidos en los conductores, esta elevación de la corriente produciría un aumento en la temperatura de los conductores de los bobinados del estator, lo que podría desencadenar un cortocircuito entre espiras o alguna falla más perjudicial en el motor.

5.2 Recomendaciones.

Identificar bien si el rotor se encuentra centrado al momento de hacer las mediciones del motor en condiciones normales de funcionamiento y de igual manera al momento de realizar las mediciones del motor con excentricidad.

Poner atención al momento de colocar las pinzas amperimétricas para la medición de la calidad de la energía.

Configurar el osciloscopio antes de tomar las medidas y dejar que el osciloscopio detecte automáticamente las características de la corriente ya sea CC o CA.

Al utilizar el equipo de eficiencia energética, es necesario estar capacitado para la utilización del mismo.

Utilizar las pinzas de acuerdo al nivel de la corriente para no tener inconvenientes.

Identificar con los colores de las pinzas para que el voltaje y la corriente sean de la misma fase.

BIBLIOGRAFÍA

Carpio, Boris. Monografías. *Monografías*. <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-asincrono/motor-asincrono.shtml>.

Científicos, Apuntes. Apuntes Científicos. *Apuntes Científicos*. [En línea] <http://apuntescientificos.org/motores.html>.

DÍAZ, Dario. 2011. *Diagnóstico de fallas en motores*. Santiago de Cali : s.n., 2011.

DUQUE, Marcelo PÉREZ y Óscar. 2005. *Motores de inducción técnicas de mantenimiento*. Madrid- Valladolid : @becedario, 2005. I.S.B.N.: 84-934437-8-6.

Ezra. Potencia Electromecánica.

Fluke. <http://www.fluke.com/fluke/eces/wheretobuy/promociones/promo-dmm/dmm-awareness-lp.htm?gclid=CPaf7IaEnsICFVNp7AodSnoAWg>.

Systems, Irvin. Irvinsystems. *Irvinsystems*.

Tuveras.com. Tuveras.com. *Tuveras.com*.

Watts-RC. Watts-RC. *Watts-RC*.

Weg. <http://www.weg.net/us/Products-Services/Electric-Motors/IEEE-841-a-Motors/Three-Phase-W22-IEEE-841-a-Petrochem-Motors-NEMA-Premium-Efficiency>.

Wikipedia. Wikipedia. [Citado el: 15 de Septiembre de 2014.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico#mediaviewer/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_\(14\).JPG](http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico#mediaviewer/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_(14).JPG).